

ISABELY CRISTINA LOURENÇO DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DOS SOLOS EM ÁREAS
REABILITADAS APÓS A MINERAÇÃO DE SUPERFÍCIE**

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

Orientador: Michel Castro Moreira

Coorientadores: Demetrius David da Silva
Ricardo Santos Silva Amorim

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S237a
2023 Santos, Isabely Cristina Lourenço dos, 1996-
Avaliação do índice de qualidade dos solos em áreas
reabilitadas após a mineração de superfície / Isabely Cristina
Lourenço dos Santos. – Viçosa, MG, 2023.
1 dissertação eletrônica (61 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Michel Castro Moreira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2023.

Referências bibliográficas: f. 43-53.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.730>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solos - Conservação. 2. Água - Conservação. 3. Solos -
Qualidade. 4. Bauxita - Minas e mineração. I. Moreira, Michel
Castro, 1980-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 631.45


ISABELY CRISTINA LOURENÇO DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DOS SOLOS EM ÁREAS
REABILITADAS APÓS A MINERAÇÃO DE SUPERFÍCIE**


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

APROVADA: 30 de agosto de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 ISABELY CRISTINA LOURENÇO DOS SANTOS
Data: 21/11/2023 20:47:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Isabely Cristina Lourenço dos Santos
Autora

Documento assinado digitalmente
 MICHEL CASTRO MOREIRA
Data: 27/11/2023 12:12:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Michel Castro Moreira
Orientador

A Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus por até aqui ter me sustentado.

Aos meus familiares, amigos e a todas as pessoas que de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste Projeto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao professor Michel Castro Moreira pela orientação e colaboração fundamentais para a realização deste Projeto.

Aos professores Ricardo Amorim e Demetrius da Silva pelas coorientações essenciais para o desenvolvimento do Projeto.

À Companhia Brasileira de Alumínio e a todos os colaboradores que auxiliaram no desenvolvimento deste projeto.

À Universidade Federal Viçosa, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola e ao seu corpo técnico pela oportunidade de Desenvolver este Projeto de Mestrado.

À Universidade Federal de Alfenas pelo apoio fornecido.

RESUMO

SANTOS, Isabely Cristina Lourenço dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2023. **Avaliação do índice de qualidade dos solos em áreas reabilitadas após a mineração de superfície**. Orientador: Michel Castro Moreira. Coorientadores: Demetrius David da Silva e Ricardo Santos Silva Amorim.

A mineração de bauxita é indispensável para o desenvolvimento socioeconômico, no entanto, essa atividade afeta as propriedades físico-químicas e biológicas do solo. As alterações provocadas no ambiente pela mineração influenciam diretamente na dinâmica de funcionamento do substrato, sendo necessário estabelecer um sistema de reabilitação que vise à manutenção e à melhoria da qualidade ambiental, a fim de que as áreas que passaram pelo processo de extração de bauxita sejam devolvidas em condições estáveis, de forma a integrar novamente a área minerada ao ecossistema natural. Dada a importância socioeconômica da mineração de bauxita, considerando seus impactos na qualidade do solo e a existência de diferentes técnicas de reabilitação do solo, o presente estudo teve como objetivo avaliar e comparar a qualidade do solo, através da identificação dos Índices de Qualidade Geral dos Solos (IQS_G), em áreas que não foram mineradas, consideradas como áreas de referência, e em áreas que foram mineradas e reabilitadas com os seguintes tratamentos: plantio de braquiária, plantio de eucalipto e plantio de vegetação nativa. Para a obtenção dos IQS_G das áreas de estudo foram realizadas análises físicas, químicas e biológicas do solo, de forma a identificar qual dos três grupos de atributos de qualidade do solo apresentou maior contribuição sobre a composição final do IQS_G. Os atributos de qualidade do solo foram integrados através da Análise de Componentes Principais (ACP). Observou-se que os indicadores químicos e biológicos foram os que apresentaram contribuições mais significativas para a composição final dos IQS_G das áreas de estudo. Com base na obtenção dos IQS_G, a reabilitação de áreas mineradas apresentou grande potencial para recuperar e até mesmo melhorar a qualidade geral dos solos, após a atividade minerária. Isso pode ser explicado devido ao fato das áreas de referência não terem passado por nenhum tipo de manejo que promovesse a melhoria das condições física, química e biológica do solo. Concluiu-se que as práticas de reabilitação ambiental de áreas mineradas por bauxita abordadas neste estudo demonstraram ser satisfatórias, garantindo a recomposição da vegetação e o restabelecimento dos processos ecológicos na área reabilitada.

Palavras-chave: Conservação de solo e água. Reabilitação ambiental. Índice de qualidade do solo. Bauxita.

ABSTRACT

SANTOS, Isabely Cristina Lourenço dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2023. **Assessment of soil quality index in areas rehabilitated after surface mining.** Adviser: Michel Castro Moreira. Co-advisers: Demetrius David da Silva and Ricardo Santos Silva Amorim.

Bauxite mining is essential for socioeconomic development. However, this activity affects the physicochemical and biological properties of the soil. The changes caused to the environment by mining directly influence the functioning dynamics of the substrate, making it necessary to establish a rehabilitation system aimed at maintaining and improving environmental quality so that the areas that went through the bauxite extraction process are returned in safe and environmentally stable productive conditions, in order to integrate the mined area back into the natural ecosystem. Soil quality indices were used to evaluate the efficiency of rehabilitation techniques in areas that have undergone the mining process. Given the socioeconomic importance of bauxite mining, considering its impacts on soil quality and the existence of different soil rehabilitation techniques, the present study aimed to evaluate and compare soil quality through the identification of the General Quality Indexes of Soils (SQI_G) in areas that were not mined, considered as reference areas, and in others that were mined and rehabilitated with the following treatments: brachiaria planting, eucalyptus planting and native vegetation planting. Soil quality attributes were integrated through Principal Component Analysis (PCA). It was observed that the chemical and biological indicators made the most significant contributions to the final composition of the SQI_G of the study areas. Based on obtaining the SQI_G, the rehabilitation of mined areas showed great potential to recover and even improve the general quality of soils after mining activity. This result can be explained by the fact that the reference areas had not undergone any type of management to improve the soil's physical, chemical and biological conditions. The conclusion reached was that the environmental rehabilitation practices for bauxite-mined areas addressed in this study proved to be satisfactory, guaranteeing the restoration of vegetation and the re-establishment of ecological processes in the rehabilitated area.

Keywords: Soil and water conservation. Environmental rehabilitation. Soil quality index. Bauxite.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicadores de qualidade do solo utilizados na análise.....	25
Tabela 2 - Análise de Componentes Principais e os respectivos atributos físico-hídricos do solo utilizados para o cálculo dos Índices de Qualidade Física dos Solos (IQS _F).....	29
Tabela 3 - Análise de Componentes Principais e os respectivos atributos químicos do solo utilizados para o cálculo dos Índices de Qualidade Química dos Solos (IQS _Q).....	33
Tabela 4 - Análise de Componentes Principais e os respectivos atributos biológicos do solo utilizados para o cálculo dos Índices de Qualidade Biológica dos Solos (IQS _B).....	36
Tabela 5 - Análise de Componentes Principais e os respectivos atributos físico-hídricos, químicos e biológicos do solo utilizados para o cálculo dos Índices de Qualidade Geral dos Solos (IQS _G).	39
Tabela A1 - Valores dos atributos físicos, químicos e biológicos dos solos.....	55
Tabela A2 - Correção da Resistência do Solo à Penetração em função do Teor de Umidade.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das Áreas de Estudo nos municípios de Divinolândia – SP e Poços de Caldas – MG.....	19
Figura 2 - Classificação dos solos na região das áreas de estudo.....	20
Figura 3 - Áreas de estudo.....	21
Figura 4 - Coletas de solo: a) amostra indeformada com amostrador de <i>Kopeck</i> ; e b) amostra deformada.	22
Figura 5 - Teste de resistência do solo à penetração.	23
Figura 6 - Teste de infiltração de água no solo utilizando o Infiltrômetro de Anéis Concêntricos.	24
Figura 7 - Representatividade das variáveis físico-hídricas dos solos nas áreas de estudo.	30
Figura 8 - Comparação dos valores médios dos Índices de Qualidade Física dos Solos (IQS _F) das áreas de estudo.	31
Figura 9 - Representatividade das variáveis químicas dos solos nas áreas de estudo.	33
Figura 10 - Comparação dos valores médios dos Índices de Qualidade Química dos Solos (IQS _Q) das áreas de estudo.	34
Figura 11 - Representatividade das variáveis biológicas dos solos nas áreas de estudo.	36
Figura 12 - Comparação dos valores médios dos Índices de Qualidade Biológica dos Solos (IQS _B) das áreas de estudo.....	37
Figura 13 - Comparação dos valores médios dos Índices de Qualidade Geral dos Solos (IQS _G) das áreas de estudo.	40
Figura A1 - Curvas de Infiltração de Água no Solo.....	57
Figura B1 - Áreas de Pastagem consideradas neste estudo: a) Não minerada; e b) Reabilitada.....	60
Figura B2 - Áreas de Eucalipto consideradas neste estudo: a) Não minerada; e b) Reabilitada.	60
Figura B3 - Áreas de Nativa consideradas neste estudo: a) Não minerada; e b) Reabilitada...61	61

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1. Mineração de superfície.....	12
2.2. Impactos ambientais oriundos da extração de bauxita.....	13
2.3. Reabilitação ambiental de áreas mineradas por bauxita.....	14
2.4. Atributos físicos, químicos e biológicos da qualidade do solo.....	15
2.5. Índice de Qualidade do Solo.....	17
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1. Áreas de estudo.....	19
3.2. Caracterização das áreas de estudo.....	21
3.2.1. Caracterização física dos solos.....	22
3.2.2. Caracterização química dos solos.....	24
3.2.3. Caracterização biológica dos solos.....	24
3.3. Cálculo dos Índices de Qualidade dos Solos.....	24
3.3.1. Índices de Qualidade Física dos Solos (IQS _F).....	27
3.3.2. Índices de Qualidade Química dos Solos (IQS _Q).....	27
3.3.3. Índices de Qualidade Biológica dos Solos (IQS _B).....	28
3.3.4. Índices de Qualidade Geral dos Solos (IQS _G).....	28
3.4. Qualidade do solo em áreas não mineradas e em áreas reabilitadas após a mineração.....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1. Índices de Qualidade Física dos Solos (IQS _F).....	29
4.2. Índices de Qualidade Química dos Solos (IQS _Q).....	32
4.3. Índices de Qualidade Biológica dos Solos (IQS _B).....	35
4.4. Índices de Qualidade Geral dos Solos (IQS _G).....	38
5. CONCLUSÕES.....	42
REFERÊNCIAS.....	43
APÊNDICES.....	54
APÊNDICE A – Dados de campo.....	55
APÊNDICE B – Área de estudo.....	60

1. INTRODUÇÃO

A atividade minerária é tida como uma das práticas mais antigas da humanidade. Considerada como utilidade pública, ela é fundamental para o desenvolvimento da sociedade, no entanto, apresenta uma alta capacidade de degradação do meio ambiente, fato este que exige a adoção de técnicas avançadas para o reestabelecimento das condições ambientais do terreno, após a extração do minério (Melo *et al.*, 2018).

O Brasil detém grande parte das maiores reservas de minério do mundo, dentre as quais se destaca o alumínio, um dos principais minerais em maior abundância que compõem a crosta terrestre. A produção do alumínio tem início com a extração de bauxita, comumente feita pelo método de lavra em tiras, por meio do decapeamento e empilhamento da camada superficial do solo (Negrão; Pöllmann; Alves, 2021; Pinto, 2019).

A bauxita possui uma distribuição difusa e pontual, e geralmente é encontrada nos topos de morros e encostas, sob a forma de corpos superficiais. As áreas de lavra de bauxita são compostas pela vegetação local e pelos horizontes superiores do solo, denominados como *topsoil*, onde há uma maior concentração de matéria orgânica e nutrientes. A camada mineralizável de bauxita encontra-se abaixo do solo orgânico, com espessura variável, a depender da formação geológica da região (Haikun *et al.*, 2021).

Para realizar a lavra da bauxita é necessário remover e estocar a camada superficial do solo de forma criteriosa, pois a mesma é reutilizada na recomposição e reabilitação ambiental da área minerada. Após a remoção da camada superficial do solo, a bauxita é retirada por meio de maquinários e equipamentos pesados, para posterior beneficiamento na planta industrial. Depois que o minério é retirado, inicia-se a etapa de reabilitação ambiental da área, com o objetivo principal de promover a manutenção dos recursos naturais do local (Matos *et al.*, 2020).

A etapa de reabilitação da área em que foi extraída a bauxita envolve os processos de reconformação topográfica do terreno, descompactação do solo e preparo do substrato para receber o plantio. A área é reabilitada de acordo com a composição vegetal anterior à exploração, ou outra requerida pelo proprietário do terreno, desde que esteja em conformidade com as legislações ambientais (Martins *et al.*, 2020).

Devido à localização geológica da bauxita, sua extração é relativamente rápida, o que representa o uso temporário da terra, trazendo como consequência uma maior escala de área impactada. De acordo com Kumari e Maiti (2022), a remoção da cobertura vegetal e a movimentação das camadas superficiais do solo afetam principalmente o regime de escoamento de água e as propriedades físicas e químicas do solo, devido à exposição das

camadas inferiores do substrato, o que pode causar perda de nutrientes e de matéria orgânica. Outro impacto mencionado pelos autores é a alteração da declividade e do relevo local, em decorrência do rebaixamento do nível do terreno.

Barros *et al.* (2019) destacam como impactos oriundos da atividade de extração, a redução da capacidade de infiltração dos solos e conseqüentemente, o assoreamento dos cursos d'água. Os autores mencionam ainda a perda da biodiversidade e da fertilidade biológica do solo, a compactação e a modificação da estratigrafia da região.

Tendo em vista os impactos mencionados, a etapa de reabilitação ambiental das áreas mineradas apresenta papel fundamental na reestruturação ecológica do meio, de forma a minimizar os efeitos negativos da mineração. Desta forma, para que o processo de reabilitação mantenha as funções do solo, torna-se necessário aplicar metodologias que auxiliem na manutenção dos serviços ecossistêmicos, que sejam capazes de mitigar os efeitos causados pela atividade minerária, e que subsidiem a tomada de decisões quanto à efetividade das técnicas de restauração implantadas (Melo, 2020).

Devido ao fato das áreas degradadas apresentarem características únicas e desafios divergentes, avaliar o impacto da mineração sobre a qualidade dos solos se torna uma atividade complexa, por exigir a seleção de um conjunto mínimo de parâmetros, designados como indicadores de qualidade do solo (Embrapa, 2018).

Diante do mencionado, torna-se impossível definir um padrão de qualidade universal para todos os solos e, desta forma, estratégias têm sido sugeridas para implementar o Índice de Qualidade do Solo, de forma a integrar os diversos atributos do solo, convertendo-se em uma potencial ferramenta para a interpretação dos resultados e direcionamento das técnicas de reabilitação de áreas mineradas por bauxita (Silva *et al.*, 2021).

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo avaliar e comparar a qualidade do solo, através da identificação dos Índices de Qualidade Geral dos Solos (IQS_G), em áreas que não foram mineradas, consideradas como áreas de referência, e em áreas que foram mineradas e reabilitadas com os seguintes tratamentos: plantio de braquiária, plantio de eucalipto e plantio de vegetação nativa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Mineração de superfície

A degradação ambiental e o uso consciente dos recursos naturais são pautas nos mais variados debates relacionados ao meio ambiente. As questões socioambientais têm recebido cada vez mais atenção, principalmente em programas que visam o desenvolvimento sustentável das atividades minerárias, que são consideradas como fontes de riquezas nas regiões onde elas ocorrem, uma vez que se bem administrada, a mineração contribui para o desenvolvimento socioeconômico local (Xavier *et al.*, 2021).

De acordo com Hidayah e Abidin (2017), a atividade minerária é realizada através de minas de superfície (denominadas como minas a céu aberto), minas subterrâneas, pedreiras ou poços, e é composta pelas etapas de extração e de beneficiamento dos minerais que se encontram em estado natural no meio ambiente, seja sólido, líquido ou gasoso.

Embora o significado seja simples, a atividade minerária apresenta certa complexidade, pois demanda grandes investimentos e planejamentos estratégicos em longo prazo, o que pode ser agravado a depender de onde será implantada, tendo em vista que na grande maioria das vezes, as regiões não apresentam infraestrutura necessária para a operação, pois a atividade é limitada aos locais em que os processos geológicos ocorreram, ou seja, onde existem os recursos naturais (ANM, 2018).

Dentre os minerais de grande interesse econômico e fortemente explorados, destaca-se a bauxita, que corresponde ao minério a partir do qual se obtém o alumínio. De acordo com Yao *et al.* (2017), as reservas mundiais de bauxita, até então conhecidas, alcançam cerca de setenta bilhões de toneladas, com a capacidade de atender a demanda dos mercados globais pelos próximos duzentos e cinquenta anos. No Brasil, as reservas de bauxita além de serem consideradas de ótima qualidade, estão entre as maiores do mundo, ficando atrás apenas da Austrália e Guiné (Barbosa *et al.*, 2022), sendo que as jazidas brasileiras se encontram principalmente, sobre florestas naturais, pastagens, plantios florestais e cultivos agrícolas.

A extração de bauxita apresenta como característica principal a mineração de superfície, que consiste na remoção da camada superficial do solo (Chen *et al.*, 2022). Para que a exploração de bauxita seja viabilizada, faz-se necessário remover a vegetação e as camadas superficiais do solo, denominadas como *topsoil*, região onde é encontrada a maior concentração de nutrientes e matéria orgânica do solo. Em seguida são removidas também as camadas de rocha e argila, denominadas como estéril, de forma a alcançar a camada mineralizável (Narayanan *et al.*, 2021). Após todo esse processo, o minério é retirado, e o

material movimentado anteriormente (estéril e *topsoil*) é retornado ao local para preencher as cavas, reconstituir a topografia e favorecer a revegetação (Annandale; Meadows; Erskine, 2021).

Ao levar em consideração que a extração de bauxita é relativamente rápida, os empreendimentos minerários negociam a exploração do minério com os proprietários dos terrenos, e com isso adquirem também a obrigação legal de reabilitar as áreas e devolvê-las aos proprietários com a cultura pré-estabelecida em contrato (Dresse; Nielsen; Fischhendler, 2021). Diante do exposto, surge a necessidade de se definir estratégias de reabilitação da qualidade do solo, de forma a garantir o desenvolvimento eficiente das culturas a curto ou médio prazo.

2.2. Impactos ambientais oriundos da extração de bauxita

A produção nacional de bauxita leva à geração de tributos e empregos, além de agregar valor à cadeia nacional, contudo, esse tipo de empreendimento gera ônus em relação à alteração da paisagem natural (Hansen *et al.*, 2023).

Nigam *et al.* (2017) e Zhang *et al.* (2015) destacam que boa parte das interferências no meio natural, advindas da atividade minerária, relacionam-se com as alterações da estrutura original do solo e da declividade, em decorrência da mudança topográfica local oriunda da retirada da camada mineralizável de bauxita.

De acordo com Matos *et al.* (2020), a mineração de superfície afeta com maior severidade as propriedades físico-químicas do solo, levando à perda da sua camada superficial e à alteração da sua estrutura, fatores esses que influenciam diretamente nos processos hidrológicos, na concentração de nutrientes e de matéria orgânica do substrato, tendo em vista que a retirada da camada superficial expõe os horizontes inferiores do solo, podendo levar inclusive à formação de erosões.

Um solo degradado tem sua capacidade produtiva reduzida, o que pode gerar alterações nas suas propriedades físicas, químicas e biológicas. A perda da qualidade do solo dificulta o crescimento de culturas, além de restringir o desenvolvimento das funções do substrato, levando a uma perturbação nos limites do uso da terra e do ecossistema, e conseqüentemente, afetando a produtividade biológica do meio (Mergulhão; Silva; Lyra, 2020).

Na mineração de bauxita, no entanto, devido ao fato dela ser encontrada geralmente nas camadas mais superficiais do solo, os impactos ambientais podem ser controlados e corrigidos de forma sistêmica e relativamente rápida (Fonseca, 2021), requerendo para tanto a adoção de práticas adequadas de reabilitação ambiental.

2.3. Reabilitação ambiental de áreas mineradas por bauxita

Devido à degradação do solo e suas consequências, a reabilitação das áreas mineradas constitui em uma obrigação legal constante no Código Florestal Brasileiro (Brasil, 2012). O Código Florestal Brasileiro estabelece diferentes tipologias e categorias de proteção, de forma a garantir a preservação e a conservação dos recursos naturais, por meio do uso controlado dos mesmos. Desta forma, é considerado como um instrumento político fundamental para a gestão do desenvolvimento econômico sustentável do país (Rodrigues; Matavelli, 2020).

Para minimizar e/ou evitar os impactos negativos da atividade minerária é necessário estabelecer um sistema de reabilitação ambiental sustentável, através de técnicas que visem à manutenção e a melhoria da qualidade ambiental, de forma a reestabelecer o equilíbrio dinâmico das áreas mineradas, a fim de que as áreas que passaram pelo processo de extração da bauxita sejam devolvidas ao seu proprietário em condições produtivas seguras e ambientalmente estáveis, de forma a integrar novamente a área perturbada ao ecossistema natural (Chen *et al.*, 2022).

Para isso, segundo Santos (2017), é necessário que o plano de reabilitação ambiental das áreas mineradas aborde o monitoramento dos diversos indicadores físicos, químicos e biológicos, que estão diretamente relacionados com a qualidade do solo. Além disso, o plano deve propor a formação de paisagens estáveis na área perturbada, através da preparação e recuperação do solo, de forma a receber a vegetação, sendo necessário que as espécies favoreçam o processo de sucessão ecológica (Barbosa *et al.*, 2021). Para isso, Fonseca, Martins e Villa (2023) afirmam que algumas técnicas têm sido adotadas no processo de reabilitação ambiental de áreas mineradas por bauxita, como por exemplo, a rotação de culturas, juntamente com espécies de gramíneas, que aumentam a quantidade de resíduos e proteção do solo. No Sul de Minas Gerais, as áreas de mineração de bauxita são, em sua maioria, áreas antropizadas, compostas principalmente por pastagem e eucalipto, sendo assim, grande parte das técnicas de reabilitação após a extração de bauxita é acordada com o proprietário do terreno, ficando a critério dele, qual espécie a ser utilizada na área perturbada (Barros *et al.*, 2019), no entanto, para a atividade minerária desenvolvida em uma área de nativas, obrigatoriamente a reabilitação deve ser feita com o plantio de nativas (Brasil Neto *et al.*, 2021).

2.4. Atributos físicos, químicos e biológicos da qualidade do solo

Os atributos de qualidade do solo são fundamentais para o diagnóstico da fertilidade dos solos, podendo ser utilizados para aperfeiçoar a sustentabilidade do manejo, de forma a garantir a recomposição do ecossistema perturbado. São utilizados três tipos de atributos, sendo eles os físicos, os químicos e os biológicos (Cotrim *et al.*, 2022).

A avaliação dos atributos físicos é fundamental para identificar a eficiência do manejo sobre a qualidade do solo. Dentre eles, pode-se destacar a textura, a densidade, a porosidade, a capacidade de infiltração e a resistência à penetração (Kome *et al.*, 2019).

A densidade é frequentemente utilizada na identificação de processos de degradação, tendo em vista que a mesma é afetada em função do uso e do manejo do solo (Bonfante; Terribile; Bouma, 2019). Esse atributo é considerado como o principal indicador de compactação do solo, sendo que sua elevação pode causar efeitos negativos no desenvolvimento do sistema radicular das plantas, uma vez que provoca a redução da porosidade e das taxas de infiltração de água (Carvalho *et al.*, 2020).

De acordo com Jamali *et al.* (2021), a compactação do solo é considerada como um fator crucial na efetividade das funções do substrato, sendo que seu aumento provoca alteração da estrutura e perda da porosidade. Com a perda da porosidade, o crescimento de raízes fica restringido, devido ao comprometimento do movimento de ar, água e solutos no solo, além de favorecer a formação de erosões, pois a capacidade de infiltração do solo reduz consideravelmente (Pandey *et al.*, 2021).

A infiltração da água no solo é um atributo indispensável para o monitoramento da eficiência da reabilitação das áreas mineradas, por estar relacionada às perdas de solo e nutrientes, e por se tratar de um dos principais componentes do processo hidrológico, além de estar diretamente ligada à recarga do lençol freático (Spletzer *et al.*, 2021). Esse fato, na maioria das vezes, acaba se tornando uma fragilidade enfrentada pelos empreendimentos minerários, ao levar em consideração as frequentes objeções por parte das comunidades, quanto ao esgotamento dos recursos hídricos em regiões minerárias (Oliveira, 2020).

Além de avaliar os efeitos da mineração sobre os atributos físicos do solo, em um plano de reabilitação de áreas mineradas, deve-se também levar em consideração a caracterização das suas propriedades químicas e biológicas.

A avaliação química de um solo é fundamental para a compreensão da ciclagem de nutrientes nos sistemas produtivos, e é realizada através da caracterização de macro e micronutrientes, e de sua fertilidade (Fernandes *et al.*, 2018). Os chamados macronutrientes

são aqueles absorvidos e exigidos em maiores quantidades pelas plantas, como por exemplo, o nitrogênio (N), fósforo (P), enxofre (S), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Já os micronutrientes, sendo eles o ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), boro (B) e cloro (Cl), apesar de serem demandados em quantidades inferiores, são tão essenciais para a nutrição das plantas, quanto os macronutrientes (Silva *et al.*, 2022). Geralmente quando os níveis de micronutrientes são baixos, é necessário realizar a adubação corretiva, tendo em vista que a ausência dos mesmos pode levar a grandes perdas no desenvolvimento das plantas (Dhaliwal *et al.*, 2019).

A disponibilidade de nutrientes é importante na verificação do balanço nutricional das plantas, de forma a indicar se o plantio conserva os nutrientes em quantidades necessárias para promover uma boa fertilidade do solo (Khadka *et al.*, 2018). Tal disponibilidade é definida através dos atributos do solo, como a capacidade de troca catiônica (CTC), a saturação por bases (V%), o pH e o teor de matéria orgânica, que compõem a análise de fertilidade do substrato (Sirsat *et al.*, 2018).

A redução do teor de matéria orgânica no solo em decorrência da atividade minerária converte-se em um dos maiores entraves enfrentados durante a reabilitação, pelo fato da metodologia de extração alterar a entrada e saída de nutrientes do sistema, o que pode levar à redução dos mesmos, quando comparado aos níveis anteriores presentes na condição original do solo (Melo, 2020).

Além dos nutrientes, é necessário também realizar a quantificação da biomassa e atividade microbiana do solo, tendo em vista que os microrganismos são indispensáveis na ciclagem e fixação dos próprios nutrientes no solo (Gama-Rodrigues *et al.*, 2018).

Vasques *et al.* (2020) afirmam que os microrganismos são reconhecidos por promoverem as transformações bioquímicas dos nutrientes, de forma a disponibilizar os elementos nutritivos necessários para o desenvolvimento das plantas. Além disso, a biomassa microbiana, bem como as atividades enzimáticas contribuem para a decomposição da matéria orgânica do solo e para a estabilidade dos agregados (Kaur *et al.*, 2020).

No solo, a atividade enzimática é indispensável para a ciclagem dos nutrientes, já que atua diretamente na catalisação dos compostos, tornando os nutrientes disponíveis para as plantas. Desta forma, considera-se a atividade enzimática como parâmetro fundamental na identificação das comunidades microbiológicas do solo (Rodrigues *et al.*, 2022). A enzima β -Glicosidase está relacionada com a disponibilização da glicose, considerada como fonte de energia para os microrganismos. Os principais fatores que afetam essa enzima é a qualidade dos resíduos vegetais e o pH. A enzima Fosfatase Ácida atua diretamente na hidrólise e

mineralização do Fósforo orgânico do solo, e a enzima Arilsulfatase, por sua vez, atua na hidrólise e mineralização do Enxofre, sendo que a Matéria Orgânica é considerada como um dos principais fatores que afetam a sua atividade (Aponte *et al.*, 2020).

2.5. Índice de Qualidade do Solo

A avaliação dos impactos da mineração de superfície sobre a qualidade dos solos é fundamental para desenvolver novas metodologias de reabilitação, que visem o reestabelecimento das condições naturais do substrato, no entanto, é uma atividade complexa, devido à necessidade de se selecionar um conjunto adequado de atributos físicos, químicos e biológicos, denominados como indicadores de qualidade do solo (Kuria *et al.*, 2019), que são indispensáveis para caracterizar e monitorar o estado do solo (Rinot *et al.*, 2019).

Ademais, a dinâmica de funcionamento do solo, além de ser heterogênea na natureza, é composta por inúmeros processos físicos, químicos e biológicos que estão em constante alteração, e que muitas vezes são de difícil mensuração (Santiago; Montenegro; Pinheiro, 2018), tornando-se impossível definir um padrão de qualidade universal para os solos.

Em decorrência dos aspectos supracitados, novas metodologias têm sido abordadas para integrar tais indicadores, como por exemplo, a determinação do Índice de Qualidade dos Solos (IQS), através de modelos matemáticos, intercalados com testes estatísticos como a Análise de Componentes Principais (ACP) e a Análise de Fatores, partindo-se do princípio da definição do conjunto de indicadores de qualidade do solo e suas correlações (Oliveira Júnior, 2019), sendo que o IQS pode ser desenvolvido para avaliar tanto a qualidade geral dos solos, envolvendo atributos físicos, químicos e biológicos, quanto as qualidades física, química ou biológica dos solos, envolvendo seus respectivos atributos (físicos, químicos ou biológicos). (Nabiollahi *et al.*, 2018).

Em uma revisão da literatura feita por Simon *et al.* (2022), são destacadas as metodologias criadas por Andrews, Karlen e Cambardella (2002) e Andrews, Karlen e Mitchell (2004), cujos autores citam que para que uma avaliação de qualidade do solo seja bem conduzida, deve-se seguir, em geral, uma abordagem de três etapas: seleção dos indicadores, interpretação e integração.

Na seleção dos indicadores devem ser englobados os indicadores físicos, químicos e biológicos de qualidade do solo. Já a etapa de interpretação consiste em padronizar os indicadores de forma adimensional, convertendo seu valor real para uma escala de 0 a 1. As curvas de pontuação usadas para converter os valores medidos refletem a relação de cada indicador com as funções do solo, sendo abordadas três formas de curva de pontuação: “mais

é melhor”, “menos é melhor” e “intervalo ideal”. Por fim, após as etapas de seleção e interpretação, deve ser realizada a integração dos indicadores químicos, físicos e biológicos, de forma a traduzi-los em um único Índice de Qualidade do Solo.

De acordo com Yu *et al.* (2018), o IQS é um resultado que deve ser simples, conciso e de fácil interpretação. Existem duas estratégias para calcular o IQS: na primeira todos os indicadores têm o mesmo peso no índice e, na segunda, alguns indicadores têm maior influência do que outros no índice final, sendo a avaliação feita através de procedimentos estatísticos, como a Análise de Componentes Principais (ACP).

A ACP é um método que tem por finalidade básica a análise dos dados usados visando sua redução de sobreposições e escolha das formas mais representativas dos dados através de combinações lineares das variáveis originais, ou seja, essa metodologia reduz a dimensão dos dados, de forma a sintetizar as variâncias dos dados em poucos Componentes Principais, sendo que o primeiro componente sempre explica a maior variância dos dados linearmente correlacionados (Bunemann *et al.*, 2018).

Yu *et al.* (2018) também destacam a metodologia elaborada por Andrews, Karlen e Mitchell (2002), como sendo simples e prática. Os autores a utilizam para desenvolver IQS's, com o intuito de avaliar as influências de curto prazo de diferentes usos da terra na qualidade do solo em pastagens alcalinas semiáridas no nordeste da China. Çomakli e Turgut (2021) também utilizaram a mesma metodologia, com o objetivo de determinar o índice de qualidade do solo em áreas florestais de diferentes idades para controle de erosão em Erzurum, na Turquia. Já Zeraatpisheh *et al.* (2020) a utilizaram para avaliar a qualidade do solo em terras desmatadas e cultivadas intensivamente na província de Mazandaran, no Irã. Os autores ainda afirmam que a identificação do IQS configura-se em uma eficiente ferramenta que auxilia no entendimento da dinâmica e funcionamento do solo perturbado por qualquer atividade antrópica. Essa compreensão é fundamental para o desenvolvimento de mecanismos e novas formas de manejo e reabilitação das áreas degradadas, de forma a promover melhorias na qualidade dos solos, bem como seu uso sustentável (Feng *et al.*, 2019).

Diante disso, nota-se que definir um IQS contribui para o entendimento das variáveis envolvidas no processo de reabilitação ambiental de áreas mineradas por bauxita, com o objetivo principal de identificar as melhores práticas de manejo e recuperação do solo, que sejam adequadas e eficientes, e que favoreçam a estabilização das condições naturais do terreno, garantindo a recomposição da vegetação e o restabelecimento dos processos ecológicos nas áreas reabilitadas (One *et al.*, 2022).

Neste sentido, para que a mineração de superfície ocorra de maneira sustentável e em conformidade com a legislação ambiental, é indispensável que os empreendimentos realizem a reabilitação das áreas mineradas de maneira eficiente, reduzindo ao máximo os impactos ambientais oriundos da atividade (Yang *et al.*, 2018).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Áreas de estudo

O estudo foi desenvolvido em regiões em que foi realizada a extração de bauxita, localizadas nas áreas rurais dos municípios de Poços de Caldas - Minas Gerais e Divinolândia - São Paulo (Figura 1). A extração de bauxita empregada na região foi a do tipo céu aberto, com o avanço das frentes de lavra relativamente rápido, tendo em vista a distribuição pontual e difusa do minério.

A região está localizada na bacia hidrográfica do rio Pardo, que por sua vez se insere na bacia do rio Grande. A principal feição de relevo da região é a ocorrência do Planalto de Poços de Caldas, na borda ocidental da Serra da Mantiqueira, pertencente à Unidade Geomorfológica Planaltos Dissecados do Sul de Minas (Sardinha *et al.*, 2022).

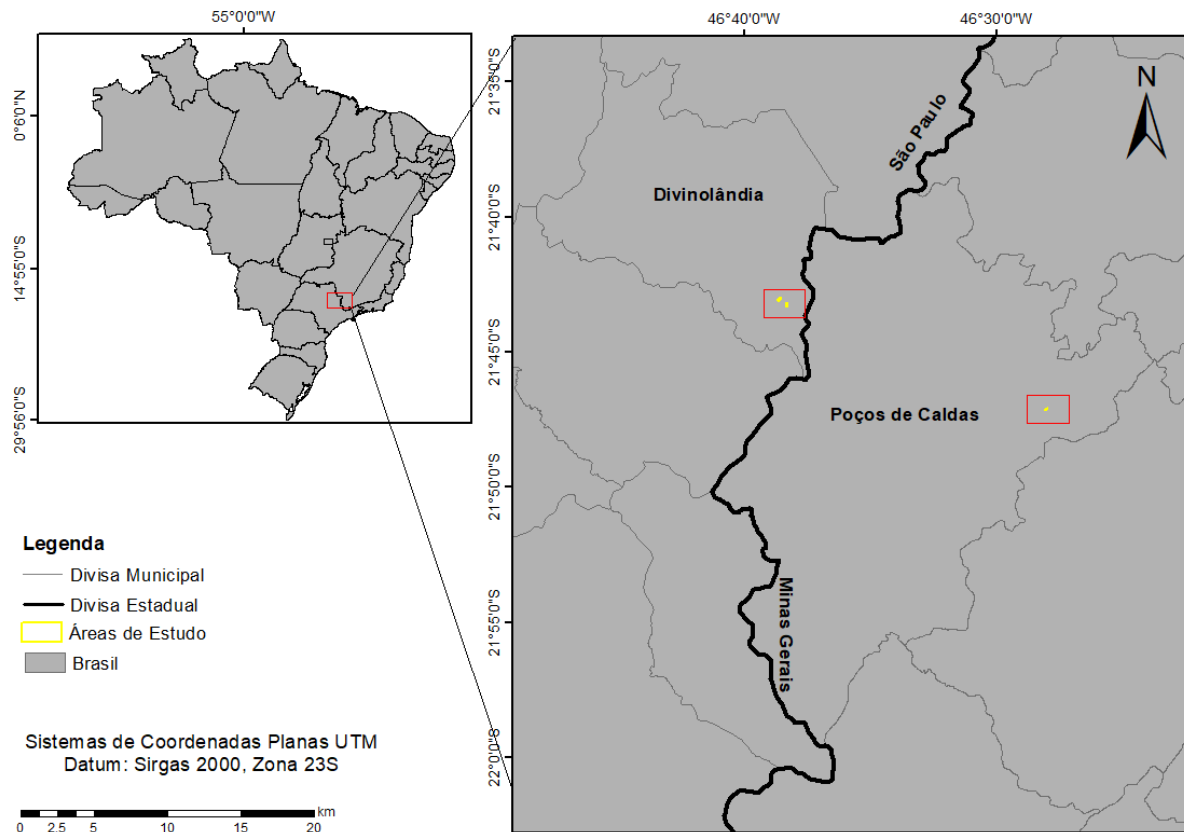


Figura 1 - Localização das áreas de estudo nos municípios de Divinolândia – SP e Poços de Caldas – MG.

O Planalto de Poços de Caldas encontra-se em uma caldeira vulcânica, que abrange vários municípios do estado de Minas Gerais e alguns municípios do estado de São Paulo. É possível identificar nessa região um complexo de intrusões alcalinas formado por rochas de nefelina-sienito (Kotani *et al.*, 2019).

O maciço alcalino de Poços de Caldas pode ser considerado um dos maiores complexos do mundo, formado predominantemente por rochas nefelíticas, tinguaítos e foiaitos, limitando-se a norte e leste com a Unidade Geomorfológica do Complexo Varginha, a sul e sudeste com a depressão Sapucaí e o Planalto de Lindóia, e a oeste com a depressão Tiête-Mogi Guaçu (Monteiro, 2020).

A região apresenta relevo geralmente montanhoso, com vales de fundo plano, onde se formam amplas várzeas aluviais. A cobertura vegetal predominante é classificada como Floresta Estacional Tropical Pluvial, com clima Cwb, subtropical de altitude, com verões brandos e estiagem no inverno (Mello *et al.*, 2022).

Em relação às classes de solos predominantes na região, a Embrapa (2020) destaca os Argissolos Vermelhos Amarelos Distróficos e Eutróficos, e Latossolos Vermelhos Distróficos, conforme pode ser identificado na Figura 2.

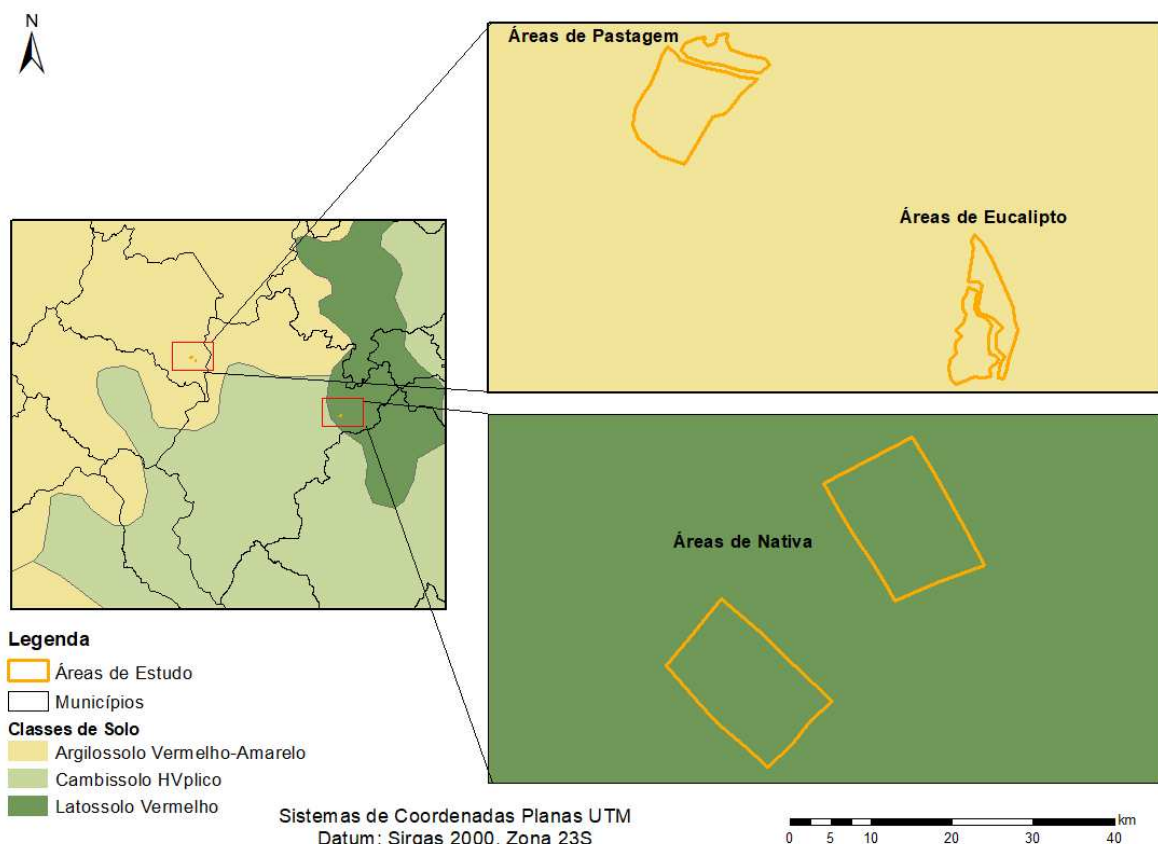


Figura 2 - Classificação dos solos na região das áreas de estudo.

Para o desenvolvimento do estudo foram selecionadas três áreas com cobertura vegetal composta por eucalipto, pastagem e mata nativa. Todas as áreas passaram pelo processo de mineração e atualmente encontram-se reabilitadas, sendo que na etapa de reabilitação, o solo foi preparado com a correção do pH através da Calagem, e com a reposição de nutrientes através da adubação. Ao lado de cada uma das áreas mineradas e reabilitadas foi selecionada uma região com o mesmo tipo de cobertura vegetal, que não passou pelo processo de mineração, consideradas como áreas de referência, de forma a fazer o comparativo entre as áreas reabilitadas após a mineração e as áreas não mineradas (Figura 3). As áreas de referência não apresentam histórico de práticas conservacionistas do solo nem da vegetação, exceto a área de referência de eucalipto, que é uma área plantada, no entanto, sua idade é desconhecida. Imagens mais detalhadas das áreas de estudo estão representadas nas Figuras B1, B2 e B3 do Apêndice B.



Figura 3 - Áreas de estudo.

Na área de mata nativa a reconformação topográfica, com a reposição das camadas de solo estéril e orgânico (*topsoil*), ocorreu em dezembro de 2007, quando se deu o início ao processo de reabilitação. Já na área de pastagem os processos de reconformação topográfica e reabilitação ocorreram em novembro de 2018. Por fim, na área de eucalipto os processos de reconformação topográfica e reabilitação se deram em novembro de 2019.

3.2. Caracterização das áreas de estudo

Foram realizadas as caracterizações física, química e biológica do substrato, como forma de subsídio para o cálculo do Índice de Qualidade Geral do Solo (IQS_G) de cada área estudada. Para tanto, considerando as culturas estudadas (mata nativa, pastagem e eucalipto), foram coletadas três amostras de solo para cada área de referência e cada área reabilitada após a mineração, totalizando 18 amostras. Amostras indeformadas foram coletadas em anel

volumétrico com o amostrador de *Kopeck* (Figura 4a), para realizar a caracterização físico-hídrica do solo.

Para realizar a caracterização química e biológica dos solos, bem como sua textura, foram coletadas amostras deformadas, no formato zig-zag, com profundidade de 0-20 centímetros, sendo que para cada ponto amostral foi realizada a amostragem composta por oito coletas, as quais foram homogeneizadas (Figura 4b).



Figura 4 - Coletas de solo: a) amostra indeformada com amostrador de *Kopeck*; e b) amostra deformada.

3.2.1. Caracterização física dos solos

Para a caracterização física e físico-hídrica do solo das áreas de estudo foram utilizados os seguintes atributos: massa específica do solo, macroporosidade, porosidade total, textura, taxa de infiltração estável e resistência do solo à penetração.

A massa específica do solo foi determinada através do método do anel volumétrico. Já na análise da textura, os teores de argila foram identificados através do Método da Pipeta - Agitação Lenta, enquanto que os teores de areia foram obtidos através do método do peneiramento. Ambas foram determinadas seguindo os procedimentos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (Embrapa, 2017).

A resistência do solo à penetração foi estimada utilizando o Medidor Digital de Compactação do Solo PLG2040 da *Falker* (Figura 5). Foi utilizada a haste com cone tipo 2, que suporta até 6.800 kPa, e profundidade máxima de medição de até 60 centímetros. Foram realizadas três repetições para cada área, totalizando em 18 amostragens.

Para cada amostragem foi realizado o teste de umidade utilizando-se o método gravimétrico. Os valores de resistência do solo à penetração medidos em campo foram

corrigidos em função do conteúdo de água no solo, através do Método estabelecido por Silva; Bianchini e Cunha (2016), conforme pode ser identificado na Tabela A2 do Apêndice A.



Figura 5 - Teste de resistência do solo à penetração.

A capacidade de infiltração de água no solo para cada área foi determinada utilizando-se o Infiltrômetro de Anéis Concêntricos (Figura 6), ambos com 30 cm de altura, 50 cm de diâmetro para o anel externo e 25 cm de diâmetro para o anel interno. O teste de infiltração utilizando infiltrômetro de anéis concêntricos é considerado um método simples e que fornece resultados rápidos, conforme foi observado em estudos desenvolvidos por Nascimento *et al.* (2020) e Andrade e Andrade (2021), nos quais os autores avaliaram a influência de diferentes sistemas de uso e manejo do solo na taxa de infiltração.

Para a realização dos ensaios, ambos os anéis foram cravados verticalmente no solo, de modo a deixar uma altura de 15 cm na superfície. Em seguida, uma lâmina d'água de 5 cm foi aplicada nos anéis.

Todas as leituras da lâmina d'água foram realizadas no anel interno em intervalo de tempo definido, ou até que o nível de água se aproximasse do mínimo recomendado, ou seja, três centímetros.

O teste foi conduzido até que a infiltração atingisse um valor estável em pelo menos três medições consecutivas. A taxa de infiltração foi calculada através da relação entre a lâmina infiltrada por intervalo de tempo de infiltração, sendo que a Taxa de Infiltração Estável considerada neste trabalho foi aquela estável em pelo menos três repetições consecutivas no final do teste. As curvas de infiltração de água no solo estão representadas na Figura A1 do Apêndice A.



Figura 6 - Teste de infiltração de água no solo utilizando o Infiltrômetro de Anéis Concêntricos.

3.2.2. Caracterização química dos solos

Para a caracterização química do solo das áreas de estudo foram utilizados os seguintes atributos: nutrientes, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico e Alumínio Trocável. A determinação dos atributos químicos do solo foi realizada utilizando-se a metodologia de análise de fertilidade dos solos, estabelecida pelo Instituto Agronômico de Campinas (2009).

3.2.3. Caracterização biológica dos solos

Para a caracterização biológica do solo das áreas de estudo foram utilizados os seguintes indicadores: β – glicosidade, fosfatase ácida e arilsulfatase. Para realizar a caracterização biológica, também foi utilizada a metodologia de análise microbiológica, estabelecida pelo Instituto Agronômico de Campinas (2009).

Esses indicadores são fundamentais na avaliação da qualidade dos solos, tendo em vista a atuação dos microrganismos no funcionamento do mesmo, por agirem diretamente na ciclagem de nutrientes e na decomposição da matéria orgânica do solo (Faria, 2020).

3.3. Cálculo dos Índices de Qualidade dos Solos

Para identificar os Índices de Qualidade Geral dos Solos (IQS_G) das áreas de estudo foram calculados os Índices de Qualidade Física do Solo (IQS_F), Índices de Qualidade Química do Solo (IQS_Q) e os Índices de Qualidade Biológica do Solo (IQS_B), de forma a se identificar qual deles (IQS_F , IQS_Q ou IQS_B) teve maior contribuição sobre a composição final do IQS_G .

Para a obtenção dos Índices, utilizou-se a metodologia estabelecida por Andrews, Karlen e Cambardella (2002) e Andrews, Karlen e Mitchell (2004), que foi executada em três etapas: obtenção das pontuações lineares dos indicadores de qualidade do solo; seleção dos indicadores através da Análise de Componentes Principais (ACP); e definição dos Índices. Os agrupamentos dos indicadores de qualidade do solo utilizados neste trabalho encontram-se representados na Tabela 1.

Tabela 1 - Indicadores de qualidade do solo utilizados na análise.

Agrupamento	Atributos analisados
Físicos	Teor de Argila (Argila) – %
	Teor de Areia (Areia) – %
	Resistência do solo à penetração (RP) – kPa
	Taxa de infiltração estável (Tie) – mm/h
	Massa específica do solo (ρ) – g/cm ³
	Macroporosidade (Ma) – m ³ /m ³
	Porosidade Total (Pt) – m ³ m ⁻³
Químicos	Matéria Orgânica (MO) – g/dm ³
	Potencial Hidrogeniônico (pH) – CaCl ₂
	Fósforo (P) – mg/dm ³
	Potássio (K) – mmolc/dm ³
	Cálcio (Ca) – mmolc/dm ³
	Magnésio (Mg) – mmolc/dm ³
	Alumínio Trocável (Al Trocável) – mmolc/dm ³
	Enxofre (S) – mg/dm ³
	Boro (B) – mg/dm ³
	Cobre (Cu) – mg/dm ³
	Ferro (Fe) – mg/dm ³
	Manganês (Mn) – mg/dm ³
	Zinco (Zn) – mg/dm ³
Biológicos	β – Glicosidade (β -G) – ρ nitrofenol g ⁻¹ solo h ⁻¹
	Fosfatase ácida (FA) – ρ nitrofenol g ⁻¹ solo h ⁻¹
	Ariilsulfatase (Ars) – ρ nitrofenol g ⁻¹ solo h ⁻¹

Foram realizadas três repetições de análises física, química e biológica para cada área de estudo, sendo elas: área de pastagem que não passou pela atividade minerária e a área de pastagem que foi minerada e reabilitada; a área de eucalipto que não passou pela atividade minerária e área de eucalipto que foi minerada e reabilitada; e área de nativa que não passou pela atividade minerária e a área de nativa que foi minerada e reabilitada. Os resultados das análises física, química e biológica encontram-se na Tabela A1 do Apêndice A.

Em relação à aquisição da pontuação linear dos dados representados na Tabela 1, a transformação foi realizada conforme proposto por Andrews, Karlen e Mitchell (2002) e Tripathi e Singal (2019), de forma a transformar cada indicador em uma pontuação sem

unidade de medida, variando de 0 a 1, sendo que para a análise “mais é melhor” utilizou-se a Equação 1, para a análise “menos é melhor”, a Equação 2, e para a análise “valor ótimo” utilizou-se a combinação entre as Equações 1 e 2, ou seja, com base na literatura e descritos nos itens 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3, estabeleceu-se um valor, considerado como ótimo para uma boa qualidade do solo, sendo que nos casos em que o indicador apresentou valor acima do ideal, utilizou-se a Equação 2 para padronizar a variável, e nos casos em que o indicador apresentou valor abaixo do ideal, utilizou-se a Equação 1.

$$SL = \frac{(x-l)}{h-l} \quad (1)$$

$$SL = 1 - \frac{(x-l)}{h-l} \quad (2)$$

em que:

- SL = pontuação linear entre 0 e 1;
- x = valor da variável;
- l = valor mínimo; e
- h = valor máximo.

Os atributos dos solos padronizados na etapa anterior foram avaliados por meio da Análise de Componentes Principais (ACP). Os Componentes Principais para um conjunto de dados são definidos como combinações lineares das variáveis que representam a variância máxima dentro do conjunto (Nogarotto; Lima; Pozza, 2020). Sobre um Componente Principal (CP) específico, cada variável recebe um peso que representa a contribuição dessa variável para a composição do CP, e cada CP explica certa porcentagem da variação do conjunto de dados total, e essa porcentagem fornece o peso para as variáveis escolhidas em um determinado CP. Sendo assim, o intuito desta etapa foi selecionar os indicadores de maior influência na qualidade dos solos, aqueles cujos Componentes Principais apresentaram autovalores ≥ 1 . Para evitar que uma variável contribua para mais de um Componente Principal, foi aplicada a rotação ortogonal através do método Varimax, que de acordo com Júnior *et al.* (2019), maximiza a variação entre os pesos de cada Componente Principal, ou seja, para cada CP, foram considerados os pesos mais significativos, excluindo aqueles próximos de zero.

Para a definição dos Índices de Qualidade do Solo (Equação 3), os atributos do solo convertidos em pontuação linear receberam pesos oriundos da ACP, e conforme a metodologia mencionada, de Andrews, Karlen e Mitchell (2002), foram selecionadas apenas

os atributos que apresentaram coeficiente de correlação maior ou igual a $|0,7|$ com os Componentes Principais.

$$IQS = \sum_{i=1}^n W_i \times SL_i \quad (3)$$

em que:

- IQS = Índice de Qualidade do Solo, adimensional;
- SL_i = pontuação linear do indicador i , adimensional; e
- W_i = variância explicada de cada Componente Principal, adimensional.

Levando em consideração a metodologia utilizada na aquisição da pontuação linear dos indicadores de qualidade do solo, proposto por Andrews, Karlen e Mitchell (2002) e Tripathi e Singal (2019), é possível considerar que quanto maior for o Índice de Qualidade do Solo, melhor é a qualidade do substrato. Sendo assim, para este estudo foi adotado que os solos que apresentaram maior Índice são os que possuem melhor qualidade.

3.3.1. Índices de Qualidade Física dos Solos (IQS_F)

Para o cálculo dos Índices de Qualidade Física dos Solos (IQS_F) utilizou-se a metodologia descrita no Item 3.3 deste trabalho, sendo que foram considerados apenas os indicadores físico-hídricos de qualidade do solo, sendo eles: Teor de Argila, Teor de Areia, Resistência do Solo à penetração (RP), Taxa de Infiltração Estável (Tie), Massa Específica do Solo (ρ), Macroporosidade (Ma) e Porosidade Total (Pt).

Em relação à aquisição da pontuação linear desses indicadores, na análise “mais é melhor” utilizou-se os atributos Taxa de Infiltração Estável e Porosidade Total. Para a análise “menos é melhor” foram utilizados os atributos Massa Específica do Solo e Resistência do Solo à Penetração. Já na interpretação “valor ótimo” foram considerados os atributos Macroporosidade, teores de Argila e Areia.

Para a Macroporosidade, Silva *et al.* (2022) destacam que o valor ideal para um bom desenvolvimento radicular das plantas corresponde a 1/3 da porosidade total. Já em relação aos teores Argila e Areia, adotou-se como valor ótimo 60% e 40%, respectivamente, conforme recomendado por Hobbey; Prater (2018).

3.3.2. Índices de Qualidade Química dos Solos (IQS_Q)

No cálculo dos Índices de Qualidade Química dos Solos (IQS_Q) foram consideradas apenas as variáveis químicas de qualidade do solo, sendo elas: Matéria Orgânica (MO), Potencial Hidrogeniônico (pH), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg),

Alumínio Trocável (Al Trocável), Enxofre (S), Boro (B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn).

Para transformar os valores das variáveis em pontuação linear, considerou-se na análise “mais é melhor” as variáveis Matéria Orgânica, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio, Boro, Cobre, Ferro, Manganês, Enxofre e Zinco. Para a análise "menos é melhor" foi utilizado o atributo Alumínio Trocável, e na interpretação “valor ótimo” foi considerada a variável Potencial Hidrogeniônico, cujo valor ótimo considerado foi de 6,5, conforme recomendado por Seccatto *et al.* (2022).

3.3.3. Índices de Qualidade Biológica dos Solos (IQS_B)

Na identificação dos Índices de Qualidade Biológica dos Solos (IQS_B) foram considerados os indicadores biológicos de qualidade do solo, sendo eles β – Glicosidade (β -G), Fosfatase Ácida (FA) e Arilsulfatase (Ars). Para a aquisição da pontuação linear desses indicadores considerou-se apenas a análise “mais é melhor”.

3.3.4. Índices de Qualidade Geral dos Solos (IQS_G)

Já para a identificação dos Índices de Qualidade Geral dos Solos (IQS_G) foram utilizados todos os atributos de qualidade do solo descritos neste trabalho (físicos, químicos e biológicos).

Em relação à padronização linear, utilizou-se na análise “mais é melhor” os atributos Matéria Orgânica (MO), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Boro (B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mg), Enxofre (S), Zinco (Zn), β – Glicosidade (β -G), Fosfatase Ácida (FA), Arilsulfatase (Ars), Taxa de Infiltração Estável (Tie) e Porosidade (Pt). Para a análise "menos é melhor" foram utilizados os atributos Alumínio Trocável (Al Trocável), Massa Específica do Solo (ρ) e Resistência do Solo à Penetração (RP). Já na interpretação “valor ótimo” foram consideradas as variáveis Potencial Hidrogeniônico (pH), Macroporosidade (Ma), teores de Argila e Areia, conforme literaturas mencionadas anteriormente.

3.4. Qualidade do solo em áreas não mineradas e em áreas reabilitadas após a mineração

Os Índices de Qualidade do Solo foram obtidos para as áreas de referência, e para as áreas reabilitadas após a mineração, com as coberturas da terra de vegetação nativa, eucalipto e pastagem, considerando três repetições para cada área. Os valores dos Índices foram submetidos ao teste de média, comparadas pelo Teste T-Student, ao nível de 5% de probabilidade, considerando quatro contrastes, de forma a identificar:

1 – se a área reabilitada com pastagem recuperou a qualidade do solo, quando comparada com a área de referência (área de pastagem não minerada);

2 – se a área reabilitada com eucalipto recuperou a qualidade do solo, quando comparada com a área de referência (área de eucalipto não minerada);

3 – se a área reabilitada com nativa recuperou a qualidade do solo, quando comparada com a área de referência (área de nativa não minerada); e

4 – qual tipo de cultura favorece mais a recuperação da qualidade do solo, considerando as reabilitações feitas com pastagem e eucalipto, tendo em vista que as áreas reabilitadas com esses dois tipos de plantio apresentam a mesma classe de solo (Latossolo Vermelho).

Levando em consideração a metodologia utilizada na aquisição da pontuação linear dos indicadores de qualidade do solo, proposto por Andrews, Karlen e Mitchell (2002) e Tripathi e Singal (2019), é possível considerar que quanto maior for o Índice de Qualidade do Solo, melhor é a qualidade do substrato. Sendo assim, considerou-se neste estudo que os solos que apresentaram maior Índice são os que possuem melhor qualidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Índices de Qualidade Física dos Solos (IQS_F)

Na Tabela 2 encontra-se a Análise de Componentes Principais para a identificação dos Índices de Qualidade Física dos Solos (IQS_F), na qual se observa que os dois e únicos Componentes Principais (CP) que apresentaram autovalores maiores ou iguais a um, explicaram 82,87% da variância global dos dados, sendo que o primeiro Componente explicou 54,88% da variância total dos dados, enquanto o segundo Componente 27,99%.

Tabela 2 - Análise de Componentes Principais e os respectivos atributos físico-hídricos do solo utilizados para o cálculo dos Índices de Qualidade Física dos Solos (IQS_F).

	CP1	CP2
Autovalores	3,84	1,96
% da Variância	54,88	27,99
% da Variância Acumulada	54,88	82,87
Correlação com os Componentes Principais		
Areia	-0,95	-0,05
Argila	0,90	-0,38
ρ	0,87	0,37
Pt	0,86	0,43
Ma	0,77	0,24
Tie	0,03	0,85
RP	0,21	0,85

ρ = Massa Específica do Solo; Pt = Porosidade Total; Ma = Macroporosidade; Tie = Taxa de Infiltração; e RP = Resistência do Solo à Penetração.

Desta forma, foram selecionados os atributos físico-hídricos do solo que apresentaram coeficiente de correlação maior ou igual a $|0,7|$ com o CP1 ou com o CP2, a fim de calcular os Índices de Qualidade Física dos Solos (IQS_F) para as áreas de estudo, sendo que os cinco primeiros (Areia, Argila, ρ , Pt e Ma) apresentaram alta correlação com o CP1, e os dois últimos (Tie e RP) com o CP2.

A Figura 7 demonstra a representatividade das variáveis físico-hídricas dos solos nas áreas de estudo, ou seja, quanto mais próxima da seta, maior é a predominância daquela variável sobre o solo da área de interesse.

Pela análise da Figura 7, observa-se que tanto a área de pastagem rehabilitada após a mineração (amostragens 4, 5 e 6), quanto a área de eucalipto não minerada (amostragens 7, 8 e 9) não apresentaram muita representatividade das variáveis envolvidas no cálculo dos IQS_F, o que não ocorreu com as áreas de nativa não minerada (amostragens 13, 14 e 15) e nativa rehabilitada após a atividade minerária (amostragens 16, 17 e 18), pois é possível verificar na Figura 7 que essas áreas apresentaram maior representatividade dos atributos estudados e, conseqüentemente, tiveram maior peso sobre a qualidade física desses solos. Além disso, destaca-se também que conforme a caracterização realizada anteriormente, as áreas de Nativa estão localizadas em outro tipo de solo, diferente das áreas de Eucalipto e Pastagem, o que pode explicar a divergência no comportamento dos tratamentos.

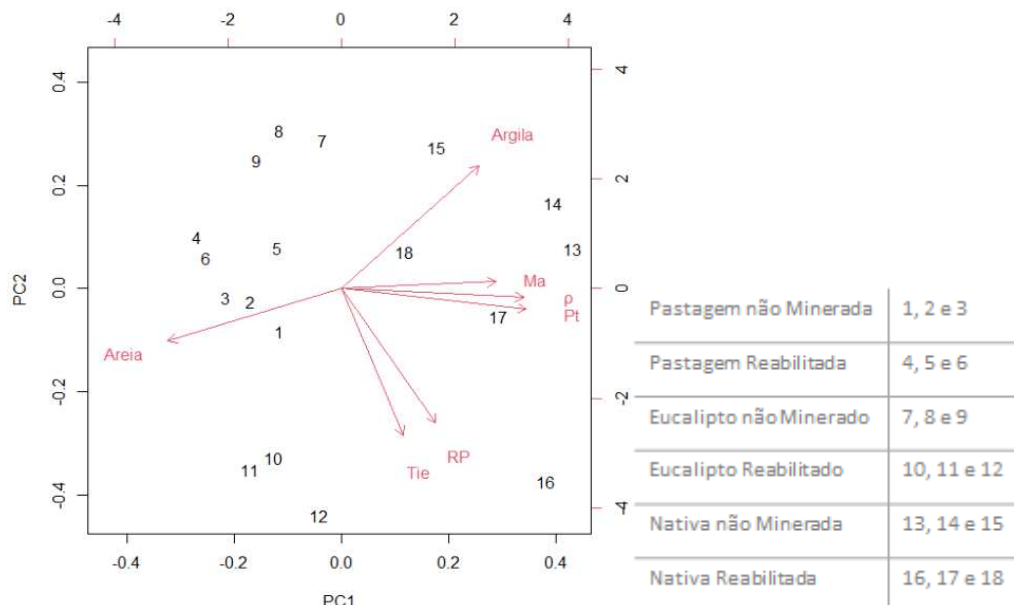


Figura 7 - Representatividade das variáveis físico-hídricas dos solos nas áreas de estudo.

ρ = Massa Específica do Solo; Pt = Porosidade Total; Ma = Macroporosidade; Tie = Taxa de Infiltração; e RP = Resistência do Solo à Penetração.

Em um estudo parecido, desenvolvido por Silva *et al.* (2020), os autores realizaram uma revisão bibliográfica de forma a desenvolver uma discussão concisa a respeito dos conceitos

de qualidade do solo, e dos indicadores físicos e químicos do substrato, e identificaram a massa específica, a macroporosidade e a porosidade total são ótimos indicadores de qualidade do solo, por permitirem a compreensão dos limites de funcionamento do substrato.

Os valores médios dos IQS_F obtidos para as áreas de estudo são apresentados na Figura 8, na qual pode ser observado que as médias dos IQS_F não apresentaram diferenças significativas.

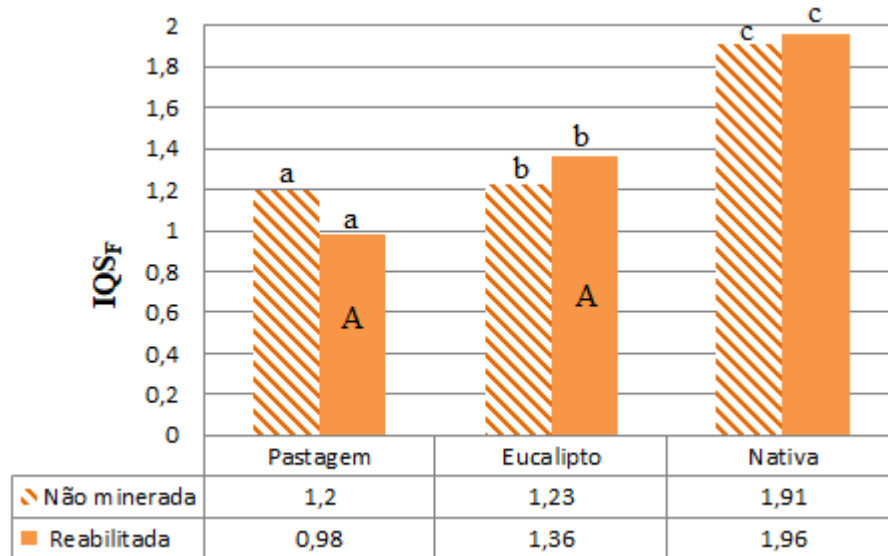


Figura 8 - Comparação dos valores médios dos Índices de Qualidade Física dos Solos (IQS_F) das áreas de estudo. Barras em cada tipo de tratamento seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste de T-Student ($p \leq 0,05$). Barras que representam a reabilitação com Pastagem e Eucalipto seguidas de mesma letra maiúscula não diferem pelo teste de T-Student ($p \leq 0,05$).

Apesar das médias não apresentarem diferenças estatisticamente significativas, infere-se que após a atividade minerária, as áreas reabilitadas com o plantio de Nativa e Eucalipto apresentaram maiores valores de IQS_F , quando comparadas com suas respectivas áreas de referência, o que não ocorreu com a área reabilitada com Pastagem, que por sua vez apresentou menor valor de IQS_F , quando comparada com sua área de referência.

Ao analisar a Figura 7, observa-se que a área de Pastagem Minerada (amostragens 4, 5 e 6), apresenta pouca influência das variáveis físicas envolvidas na geração do IQS_F , sendo que a variável mais representativa foi o Teor de Areia. Através dos resultados obtidos, nota-se que houve alteração nos atributos físicos do solo da área reabilitada com pastagem, o que pode estar associado às práticas de manejo do local, após a reabilitação. Posteriormente ao processo de reabilitação, a área foi utilizada como pastejo de bovinos por parte do proprietário do terreno, o que não ocorreu com a área de referência, que é um pasto natural, não aplicável à atividade pecuária, em termos de produtividade.

Resultados semelhantes como os obtidos neste trabalho são encontrados no estudo desenvolvido por Polanía-Hincapié *et al.* (2021), que afirmam que as práticas agrícolas indevidas levam à degradação das propriedades físicas do solo, como Massa Específica do Solo, resistência mecânica à penetração, porosidade e textura do solo. Em outro estudo desenvolvido por Burgrever *et al.* (2019) avaliou-se as propriedades físicas de um solo composto por pastagem e os autores concluíram que o manejo inadequado das pastagens levou o solo a reduzir sua qualidade física, bem como seu potencial produtivo. Desta forma pode-se inferir que o pastejo inadequado leva à alteração da qualidade física dos solos.

Ao comparar a reabilitação realizada com eucalipto e pastagem, nota-se que as médias dessas áreas reabilitadas não apresentaram diferenças estatisticamente significativas, no entanto, o IQS_F da área reabilitada com eucalipto é maior que o IQS_F da área reabilitada com pastagem.

4.2. Índices de Qualidade Química dos Solos (IQS_Q)

Na Tabela 3 encontra-se a Análise de Componentes Principais para a identificação dos Índices de Qualidade Química dos Solos (IQS_Q). Foram identificados ao todo, quatro Componentes Principais (CP) com autovalores maiores os iguais a um, sendo que o primeiro Componente explicou 30,68% da variância total dos dados, o segundo 27,15%, o terceiro 21,72%, e o quarto 10,31%. Os três primeiros Componentes juntos explicaram 79,55% da variância global dos dados e, sendo assim, somente os três foram utilizados para a identificação dos IQS_Q .

Com base na ACP, foram selecionados os atributos químicos do solo que apresentaram coeficiente de correlação maior ou igual a $|0,7|$ com os Componentes Principais. Desta forma, conforme pode ser observado na Tabela 3, quatro indicadores químicos de qualidade do solo (MO, Zn, S e Al Trocável) tiveram alta correlação com o primeiro Componente, três indicadores (Mg, Ca e pH) com o segundo Componente e três indicadores (B, Cu e Fe) com o terceiro Componente, totalizando 10 indicadores utilizados na geração dos IQS_Q .

Conforme pode ser observado na Figura 9, o atributo Fósforo (P) foi um dos que apresentaram maior representatividade na área de Pastagem Reabilitada (Amostragens 4, 5 e 6), no entanto, o Fósforo não apresentou alta correlação com os Componentes Principais, ou seja, os valores de Fósforo não entraram no cálculo dos IQS_Q , o que pode ter contribuído para a redução do IQS_Q para a área supracitada.

Tabela 3 - Análise de Componentes Principais e os respectivos atributos químicos do solo utilizados para o cálculo dos Índices de Qualidade Química dos Solos (IQS_Q).

	CP1	CP2	CP3	CP4
Autovalores	3,99	3,53	2,82	1,34
% da Variância	30,68	27,15	21,72	10,31
% da Variância Acumulada	30,68	57,83	79,55	89,85
Correlação com os Componentes Principais				
MO	0,87	-0,34	-0,08	-0,13
Zn	0,82	-0,27	0,07	0,15
S	-0,80	0,06	-0,43	0,06
Al Trocável	-0,75	0,54	0,32	0,01
Mn	0,68	-0,58	-0,15	-0,27
K	0,64	-0,08	0,49	-0,43
Mg	-0,11	0,98	-0,07	0,10
Ca	-0,28	0,94	0,02	0,15
pH	-0,44	0,86	-0,05	-0,13
B	0,02	0,01	0,91	-0,06
Cu	-0,15	0,14	0,89	-0,15
Fe	0,41	-0,28	0,80	0,23
P	-0,06	0,12	-0,07	0,96

MO = Matéria Orgânica; Zn = Zinco; S = Enxofre; Al Trocável = Alumínio Trocável; Mn = Manganês; K = Potássio; Mg = Magnésio; Ca = Cálcio; pH = Potencial Hidrogeniônico; B = Boro; Cu = Cobre; Fe = Ferro; e P = Fósforo.

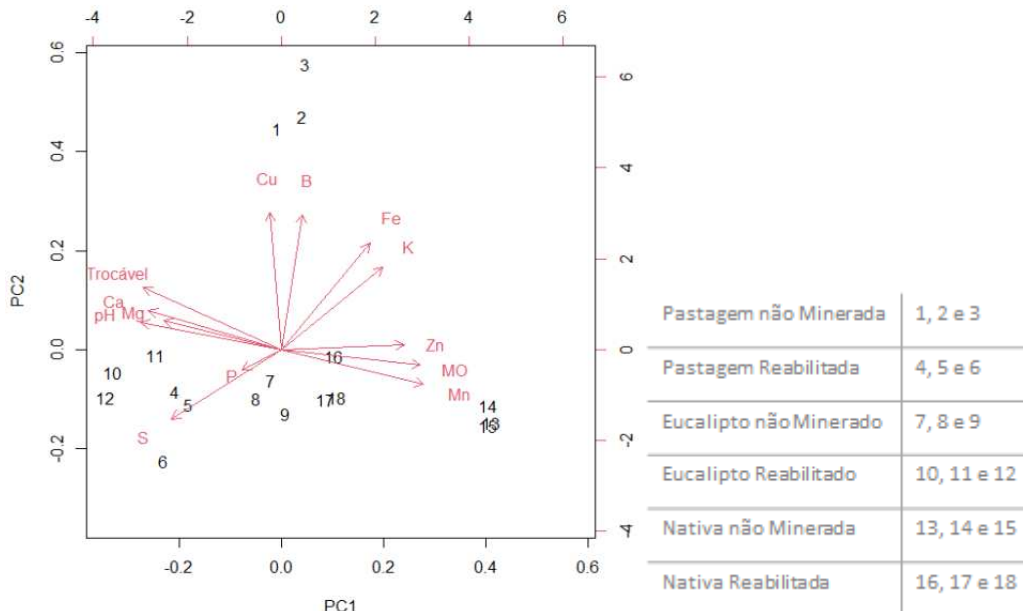


Figura 9 - Representatividade das variáveis químicas dos solos nas áreas de estudo.

MO = Matéria Orgânica; Zn = Zinco; S = Enxofre; Al Trocável = Alumínio Trocável; Mn = Manganês; K = Potássio; Mg = Magnésio; Ca = Cálcio; pH = Potencial Hidrogeniônico; B = Boro; Cu = Cobre; Fe = Ferro; e P = Fósforo.

Os valores médios dos IQS_Q referentes às áreas de estudo estão apresentados na Figura 10, na qual pode ser observado que as médias dos IQS_Q das áreas de pastagem e eucalipto apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

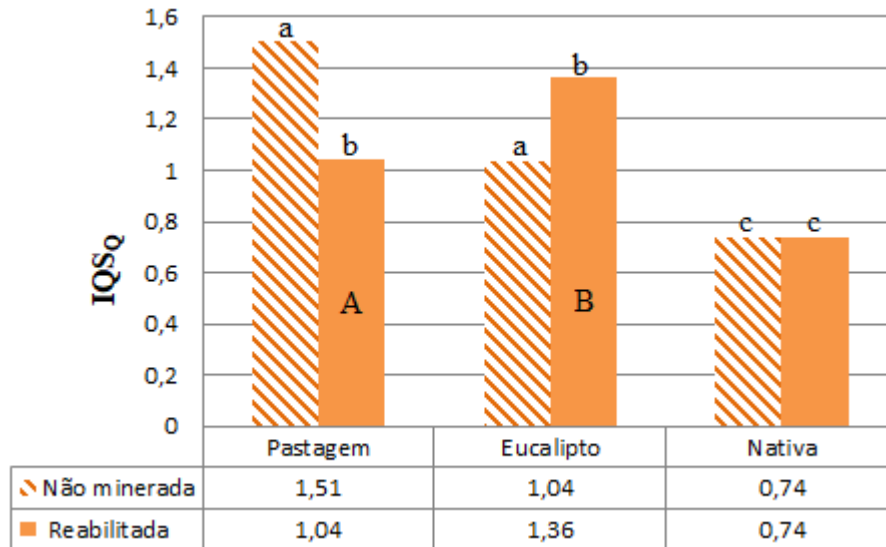


Figura 10 - Comparação dos valores médios dos Índices de Qualidade Química dos Solos (IQS_Q) das áreas de estudo.

Barras em cada tipo de tratamento seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste de T-Student ($p \leq 0,05$). Barras que representam a reabilitação com Pastagem e Eucalipto, seguidas de mesma letra maiúscula não diferem pelo teste de T-Student ($p \leq 0,05$).

Observa-se na Figura 10 que as médias das áreas de Pastagem não Minerada e Pastagem Reabilitada são estatisticamente diferentes. Isso permite afirmar que o valor do IQS_Q na área que foi minerada e reabilitada com Pastagem reduziu, quando comparado com o IQS_Q da área de referência, ou seja, houve uma alteração negativa nos atributos químicos do solo, após a reabilitação. Conforme mencionado no Item 4.1 deste trabalho, a área reabilitada com pastagem foi utilizada como pastejo bovino, o que pode estar diretamente relacionado com a qualidade química do solo. Roesch *et al.* (2019) e Abdalla *et al.* (2018) afirmam que a pecuária apresenta grande potencial para alterar a qualidade do solo. Os autores mencionam que o pisoteio do gado e o pastejo mal manejado intensificam a erosão laminar, elevam o grau de compactação dos solos e as taxas de perda de solo, o que gera como consequência o carreamento de nutrientes, fazendo com que a área apresente baixa capacidade produtiva. Em estudos semelhantes a este trabalho, Abadias *et al.* (2020) e Teutscherová *et al.* (2021) identificaram que o pastejo bovino modifica as propriedades físicas e químicas do solo, em função das formas de manejo de pastagem, causando alterações na densidade do solo, na resistência do solo à penetração e na porosidade total, o que aumenta o escoamento de água, levando à formação de erosões, e consequentemente, à perda de nutrientes.

Já em relação às áreas de Eucalipto não Minerado e Eucalipto Reabilitado, observa-se que as médias também apresentaram diferenças estatísticas. Desta forma, é possível identificar que o processo de reabilitação feito com o plantio de eucalipto promoveu uma melhoria na qualidade química do solo, quando comparada com a qualidade do solo da área de referência (área de Eucalipto não Minerada). Isso pode ser justificado pelas técnicas de correção do solo adotadas na reabilitação inicial das áreas, como a adubação e calagem, realizadas antes da etapa de revegetação da área, com o objetivo de corrigir o pH e elevar a disponibilidade de nutrientes no solo. Esse fato demonstra que o processo de reabilitação pode reparar e, até mesmo, elevar os teores de nutrientes no solo após a atividade minerária. Além disso, Bizuti *et al.* (2022), destacam que os baixos teores de nutrientes nos solos em áreas não mineradas, podem ser explicados devido à absorção das plantas e às perdas por carreamento, podendo ser agravado nos casos em que não há a reposição dos mesmos no solo.

Já em relação às áreas de Nativa não Minerada e Nativa Reabilitada, observa-se que as médias não apresentaram diferenças estatísticas significativas, ou seja, verifica-se que após a atividade minerária o processo de reabilitação com o plantio de nativas possibilitou a reconstituição da qualidade química do solo.

Em relação às áreas mineradas que foram reabilitadas com Eucalipto e Pastagem, é possível observar que as médias apresentaram diferenças estatísticas significativas. Desta forma, como o IQS_Q da área reabilitada com Eucalipto foi superior ao IQS_Q da área reabilitada com Pastagem, é possível afirmar que a reabilitação de áreas mineradas realizada com o plantio de Eucalipto apresenta maior potencial para recuperar a qualidade química do solo, quando comparado com a Pastagem. Em estudo semelhante, desenvolvido por Brancalion *et al.* (2019), os autores identificaram que o Eucalipto apresenta grande potencial para o acúmulo de biomassa, devido ao seu rápido crescimento. Além disso, destaca-se também o desenvolvimento de raízes, que aumenta a aeração do solo e, conseqüentemente, diminui o escoamento superficial, que é um dos principais mecanismos causadores do carreamento de nutrientes do solo. Diante do mencionado, o Eucalipto se torna mais competitivo na promoção da melhoria da qualidade química do solo, quando comparado com a Pastagem.

4.3. Índices de Qualidade Biológica dos Solos (IQS_B)

Na Tabela 4 encontra-se a Análise de Componentes Principais para a identificação dos Índices de Qualidade Biológica dos Solos (IQS_B). Devido ao menor número de atributos envolvidos na análise biológica, foi identificado apenas um Componente Principal (CP) com

autovalor maior ou igual a um, sendo que o mesmo explicou 94,44% da variância total dos dados.

Tabela 4 - Análise de Componentes Principais e os respectivos atributos biológicos do solo utilizados para o cálculo dos Índices de Qualidade Biológica dos Solos (IQS_B).

	CP1
Autovalor	2,83
% da Variância	94,44
% da Variância Acumulada	94,44
Correlação com o Componente Principal	
β -G	0,97
FA	0,95
Ars	0,99

β -G = β – Glicosidade; FA = Fosfatase Ácida; e Ars = Arilsulfatase.

Com base na ACP, os três indicadores biológicos de qualidade do solo tiveram alta correlação com o Componente Principal e, desta forma, foram utilizados na geração dos IQS_B.

Através da Figura 11, que demonstra a representatividade das variáveis biológicas dos solos nas áreas de estudo, observa-se que os atributos biológicos apresentaram elevada representatividade nas áreas mineradas e reabilitadas com Pastagem, Eucalipto e Nativa (Amostragens 4, 5, 6, 10, 11, 12, 16, 17 e 18).

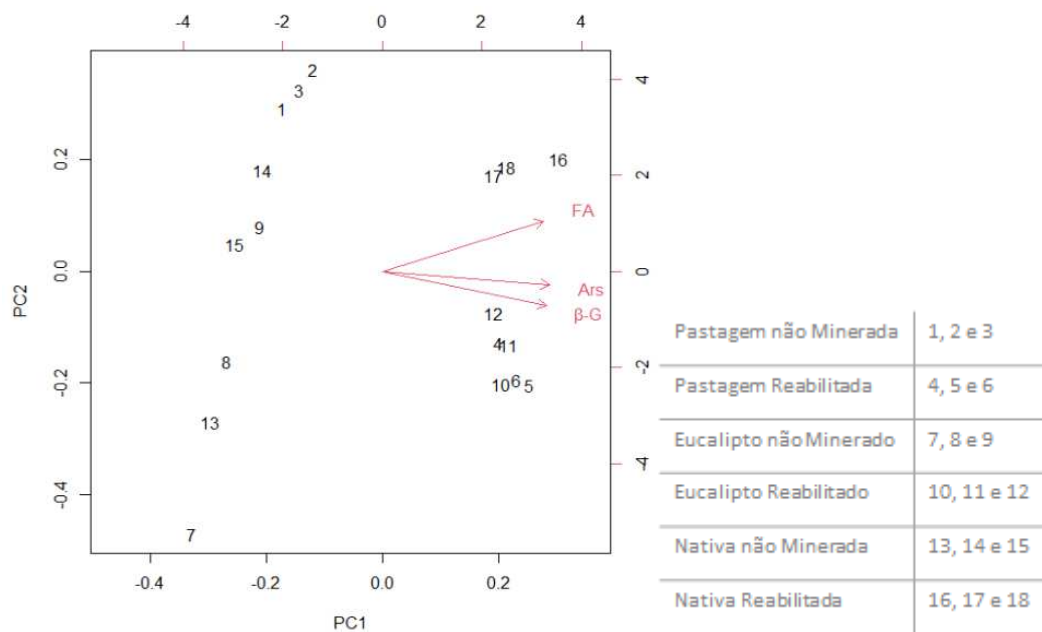


Figura 11 - Representatividade das variáveis biológicas dos solos nas áreas de estudo.
 β -G = β – Glicosidade; FA = Fosfatase Ácida; Ars = Arilsulfatase.

Os valores médios dos IQS_B estão representados na Figura 12, onde se verifica que as médias de todas as áreas não mineradas e áreas reabilitadas apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

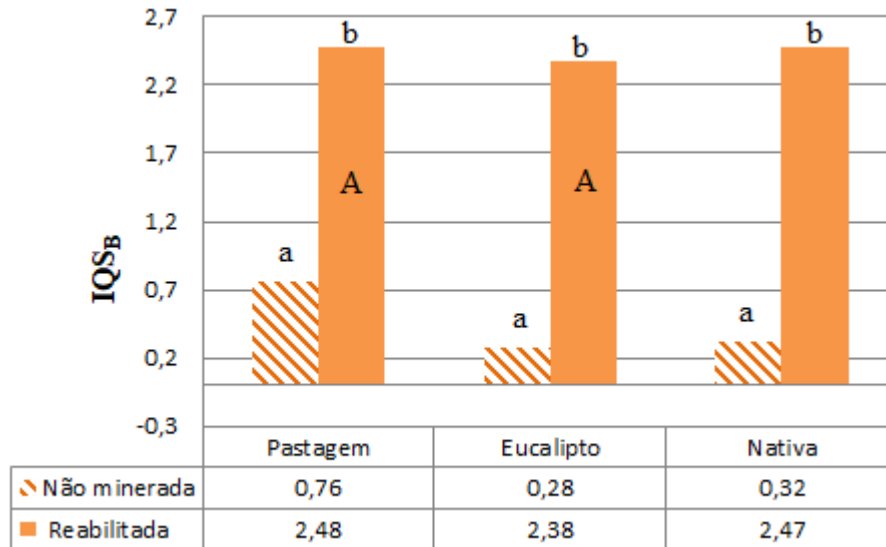


Figura 12 - Comparação dos valores médios dos Índices de Qualidade Biológica dos Solos (IQS_B) das áreas de estudo.

Barras em cada tipo de tratamento seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste de T-Student ($p \leq 0,05$). Barras que representam a reabilitação com Pastagem e Eucalipto, seguidas de mesma letra maiúscula não diferem pelo teste de T-Student ($p \leq 0,05$).

Nota-se na Figura 12 que todas as áreas reabilitadas apresentaram melhorias nos Índices de Qualidade Biológica, quando comparadas com suas respectivas áreas de referência. Com base nas etapas anteriores, observou-se que exceto a área de Pastagem, todas as outras áreas reabilitadas apresentaram IQS_F e IQS_Q iguais ou superiores aos Índices das áreas de referência, fato este que pode explicar a maior representatividade dos atributos biológicos nas áreas mineradas. Em estudo semelhante, Futa *et al.* (2020) destacam que o solo é tido como um dos reservatórios mais ricos em nutrientes essenciais aos microrganismos e que a diversidade de microrganismos no solo, bem como suas atividades enzimáticas, são determinados pelo pH, textura e pela disponibilidade de nutrientes no solo, importantes nas reações metabólicas, sendo que qualquer limitação desses indicadores pode inibir a biodegradação (Liang *et al.*, 2020). Desta forma, nota-se que a qualidade biológica está intrinsecamente relacionada com as qualidades química e física do solo.

Além disso, conforme destacado por Wu *et al.* (2021), a biomassa microbiana e a atividade enzimática apresentam recuperação muito rápida, principalmente quando em contato com o oxigênio presente no solo, processo este que é intensificado com o revolvimento do solo, considerado como uma das etapas da reabilitação, que consiste na escarificação e descompactação do solo. Desta forma, considera-se que as técnicas de

reabilitação podem ter contribuído para que as áreas mineradas tenham apresentado maiores IQS_B , quando comparadas com as áreas não mineradas.

Observa-se ainda na Figura 12 que tanto o eucalipto quanto a pastagem apresentam o mesmo potencial para restabelecer a qualidade biológica do solo, tendo em vista que as médias das áreas reabilitadas com Eucalipto e Pastagem não apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

4.4. Índices de Qualidade Geral dos Solos (IQS_G)

Para o cálculo dos IQS_G foram considerados todos os indicadores (físicos, químicos e biológicos) analisados no estudo. Com base na Análise de Componentes Principais foram identificados ao todo, cinco Componentes Principais (CP) com autovalores maiores ou iguais a um, conforme é apresentado na Tabela 5, sendo que o primeiro Componente explicou 26,58% da variância total dos dados, o segundo Componente 24,49%, o terceiro Componente 18,51%, o quarto Componente 14,53% e o quinto Componente 6,88%. Os três primeiros Componentes juntos explicaram 69,58% da variância global dos dados e, sendo assim, somente estes foram utilizados para o cálculo dos Índices de Qualidade Geral dos Solos (IQS_G).

Considerando as variáveis que apresentaram contribuições mais significativas (correlação $\geq 0,70$), conforme demonstrado na Tabela 5, observou-se que seis indicadores de qualidade do solo (Mg, Ca, pH, Ma, Argila e Areia) se correlacionaram com o primeiro Componente, cinco indicadores (Ars, FA, β -G, Zn e MO) com o segundo Componente e três indicadores (Pt, ρ e RP) com o terceiro Componente. Sendo assim, dentre os 23 indicadores de qualidade do solo envolvidos na análise, apenas 14 foram utilizados na composição dos Índices de Qualidade Geral dos Solos, sendo que os outros nove indicadores foram excluídos devido à redundância entre os atributos, ou seja, a qualidade geral dos solos está relacionada principalmente com os seguintes indicadores: Teores de Argila e Areia, Porosidade Total, Macroporosidade, Massa Específica do Solo, Resistência do Solo à Penetração, Magnésio, Cálcio, pH, Zinco, Matéria Orgânica, Enzimas β – Glicosidade, Fosfatase Ácida e Arilsulfatase.

Com base na Análise de Componentes Principais representada na Tabela 5, nota-se que na composição final dos IQS_G foram utilizados indicadores físicos, químicos e biológicos de qualidade dos solos. Os valores médios dos IQS_G estão representados na Figura 13.

Tabela 5 - Análise de Componentes Principais e os respectivos atributos físico-hídricos, químicos e biológicos do solo utilizados para o cálculo dos Índices de Qualidade Geral dos Solos (IQS_G).

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Autovalores	6,11	5,63	4,26	3,34	1,58
% da Variância	26,58	24,49	18,51	14,53	6,88
% da Variância Acumulada	26,58	51,07	69,58	84,11	90,99
Correlação com os Componentes Principais					
Mg	0,96	0,13	0,14	-0,14	-0,14
Ca	0,95	0,22	-0,01	-0,04	-0,20
pH	0,89	0,36	-0,14	-0,10	0,07
Argila	-0,83	-0,44	0,14	-0,14	-0,12
Ma	-0,70	0,16	0,46	-0,21	-0,17
Areia	0,70	0,28	-0,50	0,31	-0,19
Mn	-0,69	-0,27	0,59	-0,08	0,25
Ars	0,22	0,90	0,11	-0,30	0,10
FA	0,14	0,90	0,17	-0,04	0,26
β-G	0,17	0,89	-0,01	-0,39	0,13
Zn	-0,29	-0,83	0,24	0,03	0,11
MO	-0,39	-0,71	0,41	-0,08	0,32
Al Trocável	0,60	0,64	-0,29	0,31	-0,18
Pt	-0,44	-0,21	0,82	-0,18	-0,05
ρ	-0,49	-0,25	0,80	0,00	0,19
RP	0,10	0,22	0,77	0,15	0,12
Tie	0,24	0,54	0,67	-0,34	0,04
S	0,12	0,50	-0,60	-0,42	-0,14
B	0,10	-0,10	0,02	0,90	0,04
Cu	0,23	0,02	-0,22	0,86	0,20
Fe	-0,22	-0,45	0,15	0,80	-0,16
K	-0,15	-0,31	0,47	0,51	0,45
P	0,13	-0,23	-0,18	-0,11	-0,90

Mg = Magnésio; Ca = Cálcio; pH = Potencial Hidrogeniônico; Ma = Macroporosidade; Mn = Manganês; Ars = Arilsulfatase; FA = Fosfatase Ácida; β-G = β – Glicosidade; Zn = Zinco; MO = Matéria Orgânica; Al Trocável = Alumínio Trocável; Pt = Porosidade Total; ρ = Massa Específica do Solo; RP = Resistência do Solo à Penetração; Tie = Taxa de Infiltração Estável; S = Enxofre; B = Boro; Cu = Cobre; Fe = Ferro; K = Potássio; e P = Fósforo.

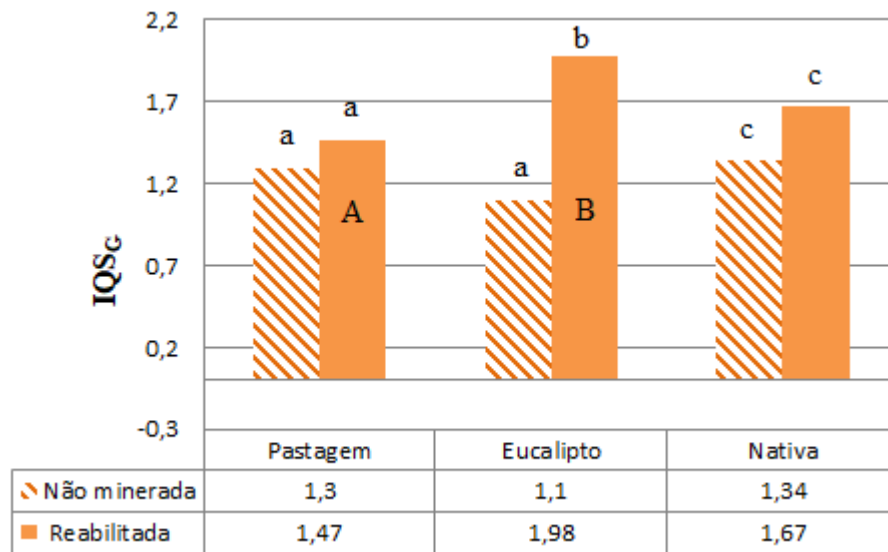


Figura 13 - Comparação dos valores médios dos Índices de Qualidade Geral dos Solos (IQSG) das áreas de estudo.

Barras em cada tipo de tratamento seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste de T-Student ($p \leq 0,05$). Barras que representam a reabilitação com Pastagem e Eucalipto, seguidas de mesma letra maiúscula não diferem pelo teste de T-Student ($p \leq 0,05$).

Em relação às áreas reabilitadas com Pastagem e Nativa, é possível observar que as médias não apresentaram diferenças estatisticamente significativas em comparação com as áreas de referência, no entanto, os IQSG das áreas reabilitadas foram superiores aos IQSG das áreas de referência, ou seja, as áreas reabilitadas com Pastagem e Nativa apresentaram potencial para recuperar a qualidade geral dos solos, após a atividade minerária.

Já em relação às áreas de Eucalipto, observa-se que as médias dos IQSG apresentaram diferenças estatisticamente significativas, desta forma, é possível afirmar que a área reabilitada com Eucalipto apresentou melhoria na qualidade geral do solo, quando comparada com a área de referência.

Em relação às áreas reabilitadas com Pastagem e Eucalipto, observa-se que as médias dos IQSG são estatisticamente diferentes e, desta forma, é possível inferir que a reabilitação realizada com o plantio de Eucalipto melhora a qualidade geral do solo, quando comparado com a Pastagem.

Levando em consideração as diferenças estatísticas entre as médias dos índices de qualidade química e biológica das áreas de estudo (Figuras 10 e 12), observou-se que os indicadores químicos e biológicos foram os que apresentaram contribuições mais significativas para a composição final do IQSG das áreas de estudo.

De forma geral, com base na obtenção dos valores de IQSG, observou-se que a reabilitação de áreas mineradas apresentou grande potencial para recuperar e até mesmo melhorar a qualidade geral dos solos, após a atividade minerária. Isso pode ser explicado

devido ao fato das áreas de referência não terem tido nenhum tipo de manejo realizado para melhorar as condições física, química e biológica do solo.

Em estudos semelhantes, onde os autores estudam a qualidade ambiental de áreas após a mineração de bauxita, é possível comprovar que a reabilitação ambiental contribui significativamente para a melhoria das áreas. Balestrin *et al.* (2021) avaliaram a diversidade de espécies arbóreas e os padrões de dominância nos estoques de carbono em uma Mata Atlântica brasileira restaurada após a exploração de bauxita identificando que a floresta restaurada obteve um alto acúmulo de carbono, cerca de duas ou três vezes mais que as florestas secundárias com o mesmo, ou mais tempo de regeneração natural. Os autores concluíram que a restauração florestal pós-mineração de bauxita na região da Zona da Mata de Minas Gerais contribuiu para o alto acúmulo de carbono.

Spletozer *et al.* (2021) compararam o escoamento superficial em uma área antes de passar pelo processo de mineração e durante a reabilitação, após a extração da bauxita. Os autores afirmam que após a mineração de superfície o escoamento diminuiu (42,79%) durante a reabilitação, em comparação com a área de referência (antes da mineração).

Bizuti *et al.* (2022) avaliaram o potencial da restauração para recuperar os atributos do solo após a mineração de bauxita na Mata Atlântica do Brasil, identificando que as restaurações das áreas estudadas resultaram em um aumento de 10 vezes no teor de matéria orgânica do solo em áreas mineradas, bem como na recuperação do teor de fósforo. A restauração também se mostrou associada à recuperação da atividade e diversidade das comunidades bacterianas do solo, atingindo níveis semelhantes aos observados na floresta conservada. Os autores mencionam, ainda, que em poucos anos, a restauração permitiu recuperar atributos físicos, químicos e microbiológicos fundamentais do solo, atingindo níveis comparáveis aos encontrados em florestas conservadas.

Li *et al.* (2022) estudaram as características dos microrganismos em locais de recuperação de minas de bauxita, na cidade de Pingguo - China, de forma a fornecer uma base de referência científica para a recuperação de áreas mineradas. Os resultados mostraram que a recuperação aumentou significativamente os teores de nutrientes do solo, em comparação com a parcela de controle, além de ter acelerado a estabilização microbiana do solo recuperado.

Diante dos resultados obtidos, e com base nos estudos semelhantes supracitados, nota-se que os processos de reabilitação das áreas mineradas por bauxita a partir da formação de pastagem, plantio de eucalipto e plantio de vegetação nativa são eficazes e garantem a reestruturação ecológica do meio, de forma a recuperar as funcionalidades do solo.

5. CONCLUSÕES

Quando comparadas com suas respectivas áreas de referência, as áreas reabilitadas com Pastagem e Nativa apresentaram potencial para recuperar a qualidade geral dos solos, após a atividade minerária.

A área reabilitada com Eucalipto apresentou melhoria na qualidade geral do solo, quando comparada com a área de referência.

A reabilitação realizada com o plantio de Eucalipto melhora a qualidade geral do solo, quando comparado com a Pastagem.

Os indicadores químicos e biológicos foram os que apresentaram contribuições mais significativas para a composição final dos Índices de Qualidade Geral dos Solos das áreas de estudo.

Com base na obtenção dos Índices de Qualidade Geral dos Solos, a reabilitação de áreas mineradas apresentou grande potencial para recuperar e até mesmo melhorar a qualidade geral dos solos, após a atividade minerária. Isso devido ao fato das áreas de referência não terem passado por nenhum tipo de manejo que promovesse a melhoria das condições física, química e biológica do solo.

As práticas de reabilitação ambiental de áreas mineradas por bauxita abordadas neste estudo demonstraram ser satisfatórias, garantindo a recomposição da vegetação e o restabelecimento dos processos ecológicos na área reabilitada.

REFERÊNCIAS

- ABADIAS, I. M. *et al.* Identificação dos principais impactos ambientais ocasionados pelo manejo da pecuária no município de Humaitá – AM. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [S.l.], v. 9, n. 2, p. 664, 17 jul. 2020. Anima Educação. <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v9e22020664-682>. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/7893. Acesso em: 25 jun. 2023.
- ABDALLA, M. *et al.* Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.l.], v. 253, p. 62-81, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880917304693>. Acesso em: 07 jul. 2023.
- ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Alumínio: oferta mundial. Oferta Mundial**. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-contenido/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/aluminio>. Acesso em: 08 set. 2022.
- ANDRADE, M. F.; ANDRADE, M. M. F. Influência do uso e manejo do solo na velocidade de infiltração de água / Influence of soil use and handling on water infiltration speed. **Brazilian Journal Of Animal And Environmental Research**, [S.l.], v. 4, n. 4, p. 5263-5269, 21 out. 2021. South Florida Publishing LLC. <http://dx.doi.org/10.34188/bjaerv4n4-030>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/38119>. Acesso em: 04 out. 2022.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D.L.; MITCHELL, J.P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.l.], v. 90, n. 1, p. 25-45, jun. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-8809\(01\)00174-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-8809(01)00174-8). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880901001748?via%3Dihub>. Acesso em: 21 jan. 2023.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.l.], v. 68, n. 6, p. 1945-1962, nov. 2004. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>. Disponível em: <https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2136/sssaj2004.1945>. Acesso em: 21 jan. 2023.
- ANNANDALE, M.; MEADOWS, J.; ERSKINE, P. Indigenous forest livelihoods and bauxite mining: a case-study from northern australia. **Journal Of Environmental Management**, [S.l.], v. 294, p. 113014, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479721010768>. Acesso em: 26 jul. 2023.
- APONTE, H. *et al.* Meta-analysis of heavy metal effects on soil enzyme activities. **Science Of The Total Environment**, [S.l.], v. 737, p. 139744, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139744>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720332642>. Acesso em: 30 maio 2023.

BALESTRIN, D. *et al.* Brazilian atlantic forest carbon stocks undergoing active restoration after bauxite mining exploration: a trait-based approach. **Águas e Florestas: desafios para conservação e utilização**, [S.l.], p. 114-130, 2021. Editora Científica Digital. <http://dx.doi.org/10.37885/210404405>. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/articles/code/210404405>. Acesso em: 22 jul. 2023.

BARBOSA, R. S. *et al.* Restoration of degraded areas after bauxite mining in the eastern Amazon: which method to apply?. **Ecological Engineering**, [S.l.], v. 180, p. 106639, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106639>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857422001008>. Acesso em: 20 fev. 2023.

BARROS, D. A. de *et al.* Matéria orgânica e agregação do solo em áreas sobre influência da mineração de bauxita na região do planalto de Poços de Caldas, MG. **Agropecuária Científica no Semiárido**, [S.l.], v. 14, n. 2, p. 160, 14 nov. 2019. Agropecuária Científica no Semiárido. <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v14i2.1018>. Disponível em: <http://revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/view/1018>. Acesso em: 10 set. 2022.

BIZUTI, D. T. G. *et al.* Multifunctional soil recovery during the restoration of Brazil's Atlantic Forest after bauxite mining. **Journal Of Applied Ecology**, [S.l.], v. 59, n. 9, p. 2262-2273, 13 jan. 2022. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2664.14097>.

BONFANTE, A.; TERRIBILE, F.; BOUMA, J. Refining physical aspects of soil quality and soil health when exploring the effects of soil degradation and climate change on biomass production: an italian case study. **Soil**, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 1-14, 10 jan. 2019. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/soil-5-1-2019>. Disponível em: <https://soil.copernicus.org/articles/5/1/2019/>. Acesso em: 20 jun. 2021.

BRANCALION, P. H. S. *et al.* Exotic eucalypts: from demonized trees to allies of tropical forest restoration?. **Journal Of Applied Ecology**, [S.l.], v. 57, n. 1, p. 55-66, 12 out. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2664.13513>. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1365-2664.13513>. Acesso em: 10 ago. 2023.

BRASIL NETO, A. B. *et al.* Natural regeneration for restoration of degraded areas after bauxite mining: a case study in the eastern amazon. **Ecological Engineering**, [S.l.], v. 171, p. 106392, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106392>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857421002470>. Acesso em: 15 set. 2023.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. . Brasília.

BUNEMANN, E. K. *et al.* Soil quality – A critical review. **Soil Biology And Biochemistry**, [S.l.], v. 120, p. 105-125, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071718300294>. Acesso em: 15 nov. 2022.

BURGREVER, J. C. *et al.* Propriedades físicas indicadoras da qualidade do solo sob sistemas de manejo - alta floresta. **Revista Científica Rural**, [S.l.], v. 21, n. 2, p. 93-104, 2 ago. 2019. Even3. <http://dx.doi.org/10.30945/rcr-v21i2.361>.

CARVALHO, C. A. de *et al.* Atributos físicos em solos cultivados com plantas de cobertura. **Scientia Naturalis**, Rio Branco, v. 2, n. 1, p. 38-41, maio 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufac.br/revista/index.php/SciNat>. Acesso em: 01 jun. 2023.

CHEN, Y. *et al.* Extraction and Utilization of Valuable Elements from Bauxite and Bauxite Residue: a review. **Bulletin Of Environmental Contamination And Toxicology**, [S.l.], v. 109, n. 1, p. 228-237, 20 abr. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00128-022-03502-w>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00128-022-03502-w#citeas>. Acesso em: 25 fev. 2023.

ÇOMAKLI, E.; TURGUT, B. Determining the effects of the forest stand age on the soil quality index in afforested areas: a case study in the palandöken mountains. **Soil And Water Research**, [S.l.], v. 16, n. 4, p. 237-249, 31 dez. 2021. Czech Academy of Agricultural Sciences. <http://dx.doi.org/10.17221/179/2020-swr>. Disponível em: <https://www.agriculturejournals.cz/pdfs/swr/2021/04/05.pdf>. Acesso em: 18 maio 2023.

COTRIM, C. F. C. *et al.* Qualidade do solo: relevância e uso de indicadores para o monitoramento. **Revista Agrotecnologia**, Ipameri, v. 13, n. 2, p. 46-65, jan. 2022.

DHALIWAL, S. S. *et al.* Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: a review. **Environmental And Sustainability Indicators**, [S.l.], v. 1-2, p. 100007, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indic.2019.100007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665972719300078>. Acesso em: 21 jun. 2023.

DRESSE, A.; NIELSEN, J. O.; FISCHHENDLER, I. From corporate social responsibility to environmental peacebuilding: from corporate social responsibility to environmental peacebuilding: the case of bauxite mining in guinea. **Resources Policy**, [S.l.], v. 74, p. 102290, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102290>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301420721003019>. Acesso em: 26 jul. 2023.

EMBRAPA. **Índice de qualidade de solos cultivados com bananeira nas regiões oeste da Bahia e no norte de Minas Gerais**. 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/183085/1/BoletimPesquisa94-AnaLucia-.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2022.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**: 3ª edição revista e ampliada. 3ª edição revista e ampliada. 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 04 nov. 2022.

EMBRAPA. **Mapa de solos do Brasil**. 2020. Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3ABrasil_solos_5m_20201104. Acesso em: 04 set. 2022.

FARIA, V. L. de. **Qualidade do solo sob cultivo de banana em sistemas de produção orgânico e convencional em Gonçalves (MG)**. 2020. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meio Ambiente e Recursos Hídricos., Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/2166/1/Disserta%0c3%a7%0c3%a3o_2020060.pdf. Acesso em: 03 jun. 2023.

FENG, Y. *et al.* Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: a review. **Earth-Science Reviews**, [S.l.], v. 191, p. 12-25, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.015>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825217305925>. Acesso em: 29 maio 2023.

FERNANDES, J. D. *et al.* Soil Chemical Amendments and the Macronutrients Mobility Evaluation in Oxisol Treated With Biochar. **Journal Of Agricultural Science**, [S.l.], v. 10, n. 10, p. 238, 15 set. 2018. Canadian Center of Science and Education. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v10n10p238>. Disponível em: <https://www.ccsenet.org/journal/index.php/jas/article/view/0/36821>. Acesso em: 21 jun. 2023.

FONSECA, W. da S. **Bioindicadores para avaliação e monitoramento da restauração ecológica de área em ambiente de mineração de bauxita, Mirai, MG**. 2021. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/28543/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2023.

FONSECA, W. da S.; MARTINS, S. V.; VILLA, P. M. Green Manure as an Alternative for Soil Recovery in a Bauxite Mining Environment in Southeast Brazil. **Floresta e Ambiente**, [S.l.], v. 30, n. 1, p. 1-12, 2023. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087-floram-2023-0041>.

FUTA, B. *et al.* Effect of Natural Aging of Biochar on Soil Enzymatic Activity and Physicochemical Properties in Long-Term Field Experiment. **Agronomy**, [S.l.], v. 10, n. 3, p. 449, 24 mar. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy10030449>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/3/449>. Acesso em: 06 jul. 2023.

GAMA-RODRIGUES, E.F. *et al.* Atributos físicos, químicos e microbiológicos dos solos sob diferentes usos em topossequências no Noroeste Fluminense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal Of Agricultural Sciences**, [S.l.], v. 13, n. 3, p. 1-9, 30 set. 2018. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v13i3a5543>. Disponível em: <http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v13i3a5543/300>. Acesso em: 21 jun. 2023.

HAIKUN, Z. *et al.* Distribution, genetic types and current situation of exploration and development of bauxite resources. **Geology In China**, China, v. 48, n. 1, p. 68-81, fev. 2021.

HANSEN, A. M. *et al.* Social impacts of bauxite mining and refining: a review. **The Extractive Industries And Society**, [S.l.], v. 14, p. 101264, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.exis.2023.101264>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214790X23000552?via%3Dihub>. Acesso em: 22 jul. 2023.

HIDAYAH, N. N.; ABIDIN, S. Z. The evolution of mineral processing in extraction of rare earth elements using solid-liquid extraction over liquid-liquid extraction: a review. **Minerals Engineering**, [S.l.], v. 112, p. 103-113, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2017.07.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687517301942>. Acesso em: 10 out. 2022.

HOBLEY, E. U.; PRATER, I. Estimating soil texture from vis-NIR spectra. **European Journal Of Soil Science**, [S.l.], v. 70, n. 1, p. 83-95, 8 nov. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/ejss.12733>. Disponível em: <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/ejss.12733>. Acesso em: 16 set. 2023.

IAC. **Instituto Agrônomo de Campinas**. 2009. Disponível em: https://www.iac.sp.gov.br/produtoseservicos/analisedosolo/docs/Boletim_Tecnico_106_rev_atual_2009.pdf. Acesso em: 20 jun. 2023.

JAMALI, H. *et al.* Soil compaction in a new light: Know the cost of doing nothing – A cotton case study: know the cost of doing nothing ∴ a cotton case study. **Soil And Tillage Research**, [S.l.], v. 213, p. 105158, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2021.105158>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198721002312>. Acesso em: 20 jun. 2023.

KAUR, T. *et al.* Microbe-mediated biofortification for micronutrients: present status and future challenges. **New And Future Developments In Microbial Biotechnology And Bioengineering**, [S.l.], p. 1-17, 2020. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-820528-0.00002-8>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128205280000028>. Acesso em: 21 jun. 2023.

KHADKA, D. *et al.* Soil Fertility Assessment and Mapping of Regional Agricultural Research Station, Parwanipur, Bara, Nepal. **Journal Of Nepal Agricultural Research Council**, [S.l.], v. 4, p. 33-47, 6 maio 2018. Nepal Journals Online (JOL). <http://dx.doi.org/10.3126/jnarc.v4i1.19688>. Disponível em: <https://www.nepjol.info/index.php/JNARC/article/view/19688>. Acesso em: 21 jun. 2023.

KOME, G. K. *et al.* Influence of Clay Minerals on Some Soil Fertility Attributes: a review. **Open Journal Of Soil Science**, [S.l.], v. 09, n. 09, p. 155-188, 2019. Scientific Research Publishing, Inc.. <http://dx.doi.org/10.4236/ojss.2019.99010>. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=95329>. Acesso em: 20 jun. 2023.

KOTANI, T. *et al.* Matérias-primas do Planalto de Poços de Caldas: alternativas ao caulim e ao feldspato na formulação de porcelanas e materiais de revestimento. **Cerâmica Industrial**, [S.l.], v. 24, n. 2, p. 45-50, 2019. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2019.009>.

KUMARI, S.; MAITI, S. K. Nitrogen recovery in reclaimed mine soil under different amendment practices in tandem with legume and non-legume revegetation: a review. **Soil Use And Management**, [S.l.], v. 38, n. 2, p. 1113-1145, 22 fev. 2022. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/sum.12787>.

KURIA, A. W. *et al.* Farmers' knowledge of soil quality indicators along a land degradation gradient in Rwanda. **Geoderma Regional**, [S.l.], v. 16, p. 00-199, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00199>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S235200941830169X>. Acesso em: 25 maio 2023.

LI, X. *et al.* Effects of Land Reclamation on Soil Bacterial Community and Potential Functions in Bauxite Mining Area. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**, [S.l.], v. 19, n. 24, p. 16921, 16 dez. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph192416921>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/24/16921>. Acesso em: 22 jul. 2023.

LIANG, J. *et al.* Responses of enzymatic activity and microbial communities to biochar/compost amendment in sulfamethoxazole polluted wetland soil. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.l.], v. 385, p. 121533, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121533>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389419314876>. Acesso em: 06 jul. 2023.

MARTINS, W. B. R. *et al.* Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystems after mining: a global literature review. **Ecological Engineering**, [S.l.], v. 145, p. 105707, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105707>.

MATOS, A. C. S. de *et al.* **Processo produtivo da bauxita e da alumina: impactos socioambientais, formas de mitigação e o caso de Barcarena, Pará, Brasil.** Brazilian Journal Of Development. Curitiba, p. 29644-29654. mai 2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/10399>. Acesso em: 09 out. 2021.

MELLO, R. C. A. *et al.* Monossilização como principal processo de intemperismo químico no planalto alcalino de Poços de Caldas (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S.l.], v. 23, n. 3, p. 1685-1699, 1 jul. 2022. Revista Brasileira de Geomorfologia. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i3.2133>. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/2133/386386755>. Acesso em: 04 out. 2022.

MELO, C. E. S. Avaliação das práticas de recuperação ambiental na mineração de bauxita no planalto de Poços de Caldas e proposta de aprimoramento. **Banco de Dados Bibliográficos da USP**, Ouro Preto, v. -, n. -, p. 247-252, dez. 2020. Universidade de São Paulo, Agência USP de Gestão da Informação Acadêmica (AGUIA). <http://dx.doi.org/10.11606/d.3.2020.tde-09122020-103634>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/remi/a/LC3dqwMDdGXqTkr5cSbPNXy/?lang=en>. Acesso em: 09 out. 2021.

MELO, V. F. *et al.* Soil quality and reforestation of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) after laterite-type bauxite mining in the Brazilian Amazon forest. **Ecological Engineering**, [S.l.], v. 125, p. 111-118, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.10.016>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857418303938?via%3Dihub>. Acesso em: 05 set. 2022.

MERGULHÃO, A. C. E. S.; SILVA, M. L. R. B. da; LYRA, M. C. C. P. de. Microbiological status of the soil evaluation preserved and impacted by mining area in Pernambuco semiarid. **Ambiência Guarapuava**, [S.l.], v. 3, n. 15, p. 611-627, jun. 2020. Disponível em: <https://core.ac.uk/reader/427157120>. Acesso em: 04 mar. 2023.

MONTEIRO, V. A. Maquete do patrimônio geológico do maciço alcalino de Poços de Caldas, divisa SP/MG. **Revista de Geografia**, Campinas, v. 15, p. 159-176, fev. 2020. Disponível em: <http://www.revistacontinentes.com.br/index.php/continentes/article/view/211>. Acesso em: 21 fev. 2023.

NABIOLLAHI, K. *et al.* Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. **Geoderma**, [S.l.], v. 318, p. 16-28, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.024>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706117314003>. Acesso em: 04 nov. 2022.

NARAYANAN, M. *et al.* Reclamation competence of *Crotalaria juncea* with the amalgamation and influence of indigenous bacteria on a waste dump of bauxite mine. **Chemosphere**, [S.l.], v. 279, p. 130632, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130632>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653521011036>. Acesso em: 26 jul. 2023.

NASCIMENTO, L. G. *et al.* Analysis of the speed of water infiltration in the soil by means of concentric rings in the east of the city of Teresina -PI. **Brazilian Journal Of Development**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 15168-15178, mar. 2020. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n3-406>. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/8069/6983>. Acesso em: 20 nov. 2021.

NEGRÃO, L. B. A.; PÖLLMANN, H.; ALVES, T. K. C. Mineralogical Appraisal of Bauxite Overburdens from Brazil. **Minerals**, [S.l.], v. 11, n. 7, p. 677, 24 jun. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/min11070677>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/7/677>. Acesso em: 10 out. 2022.

NIGAM, G. K. *et al.* 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, Parts A/B/C**, [S.l.], v. 101, p. 137-148, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2017.07.001>.

NOGAROTTO, D. C.; LIMA, M. R. G. de; POZZA, S. A. Análise de componentes principais para verificar relação entre variáveis meteorológicas e a concentração de mp10. **Holos**, [S.l.], v. 1, p. 1-17, 19 fev. 2020. Instituto Federal de Educacao, Ciencia e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2020.8649>. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/8649>. Acesso em: 20 jun. 2023.

OLIVEIRA JÚNIOR, A. I. de *et al.* Statistical multivariate analysis applied to environmental characterization of soil in semiarid region. **Revista Caatinga**, [S.l.], v. 32, n. 1, p. 200-210, mar. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252019v32n120rc>.

Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/7483>. Acesso em: 16 set. 2023.

OLIVEIRA, M. P. da S. **A ciência e os temas emergentes em ambiente e sociedade**. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Edson-Grandisoli/publication/346967358_Capitulo_11_-_O_papel_da_pedagogia_de_sustentabilidade_na_transformacao_de_conhecimentos_e_comportamentos_de_estudantes_do_Ensino_Medio_sobre_sustentabilidade/links/5fd5429692851c13fe80f70b/Capitulo-11-O-papel-da-pedagogia-de-sustentabilidade-na-transformacao-de-conhecimentos-e-comportamentos-de-estudantes-do-Ensino-Medio-sobre-sustentabilidade.pdf#page=236. Acesso em: 09 out. 2021.

ONEȚ, A. *et al.* Evaluation of Biological Characteristics of Soil as Indicator for Sustainable Rehabilitation of a Post-Bauxite-Mining Land. **Diversity**, [S.l.], v. 14, n. 12, p. 1087, 9 dez. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/d14121087>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-2818/14/12/1087>. Acesso em: 20 jun. 2023.

PANDEY, B. K. *et al.* Plant roots sense soil compaction through restricted ethylene diffusion. **Science**, [S.l.], v. 371, n. 6526, p. 276-280, 15 jan. 2021. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.abf3013>. Disponível em: <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.abf3013>. Acesso em: 20 jun. 2023.

PINTO, V. Q. R. **Comportamento geotécnico de estéril de bauxita e seu potencial uso como estrato de fundação**. 2019. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 2019. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/38149/1/2019_VirginieQueirozRezendePinto.pdf. Acesso em: 04 out. 2022.

POLANÍA-HINCAPIÉ, K. L. *et al.* Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. **Geoderma**, [S.l.], v. 386, p. 114900, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114900>.

RINOT, O. *et al.* Soil health assessment: a critical review of current methodologies and a proposed new approach. **Science Of The Total Environment**, [S.l.], v. 648, p. 1484-1491, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.259>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718332224?via%3Dihub>. Acesso em: 21 jun. 2023.

RODRIGUES, A. do R.; MATAVELLI, C J. As principais alterações do Código Florestal Brasileiro. **Revista Brasileira de Criminalística**, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 28-35, 8 maio 2020. Associação Brasileira de Criminalística - ABC. <http://dx.doi.org/10.15260/rbc.v9i1.300>.

RODRIGUES, R. N. *et al.* Soil enzymatic activity under coffee cultivation with different water regimes associated to liming and intercropped brachiaria. **Ciência Rural**, [S.l.], v. 52, n. 3, p. 1678-4596, 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20200532>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/BFC9NSTNQ7bq4pMHsSmyDyL/?lang=en>. Acesso em: 04 maio 2023.

ROESCH, A. *et al.* An Approach for Describing the Effects of Grazing on Soil Quality in Life-Cycle Assessment. **Sustainability**, [S.l.], v. 11, n. 18, p. 4870, 6 set. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11184870>.

SANTIAGO, F. dos S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; PINHEIRO, M. R. de A. Índice de qualidade do solo em cultivo agroecológico e convencional no semiárido potiguar, Brasil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [S.l.], v. 13, n. 1, p. 97, 1 jan. 2018. Grupo Verde de Agroecologia e Abelhas. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v13i1.5333>. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/5333>. Acesso em: 04 nov. 2022.

SANTOS, J. A. G. **Recuperação e Reabilitação de Áreas Degradadas pela Mineração**. 2017. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/175225/2/recuperacao.pdf>. Acesso em: 09 set. 2022.

SARDINHA, D. de S. *et al.* Deposição atmosférica e transporte específico de sedimentos suspensos em bacias hidrográficas sob influência de mineração no Planalto de Poços de Caldas (MG). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 15, n. 4, p. 1843-1862, jun. 2022.

SECCATTO, C. P. *et al.* Caracterização do pH do solo no sítio arqueológico Templo dos Pilares (MS): algumas análises. **Aceno - Revista de Antropologia do Centro-Oeste**, [S.l.], v. 9, n. 20, p. 109-120, 18 nov. 2022. Aceno - Revista de Antropologia do Centro-Oeste. <http://dx.doi.org/10.48074/aceno.v9i20.13074>. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/aceno/article/view/13074>. Acesso em: 16 set. 2023.

SILVA, J. L. de S. *et al.* Analysis of vegetation recovery in areas impacted by bauxite mining in the Amazon Forest. **Clean Technologies And Environmental Policy**, [S.l.], v. 23, n. 5, p. 1617-1640, 27 fev. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10098-021-02052-9>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-021-02052-9#citeas>. Acesso em: 04 nov. 2022.

SILVA, M. S. da *et al.* Conhecendo a flora herbáceo-subarbusciva do Parque Estadual do Mirador, Maranhão/Brasil. **Iheringia, Série Botânica**, [S.l.], v. 77, p. 2446-8231, 5 jan. 2022. Editora Letra1. <http://dx.doi.org/10.21826/2446-82312022v77e2022002>. Disponível em: <https://isb.emnuvens.com.br/iheringia/article/view/1215>. Acesso em: 21 jun. 2023.

SILVA, M. de O. *et al.* Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal Of Development**, [S.l.], v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdvn7-431>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/13360/11223>. Acesso em: 27 jul. 2023.

SILVA, T. C. R. *et al.* Avaliação da Microestrutura de Solo Expansivo antes e após a Variação de Volume. **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, [S.l.], p. 7608-7615, ago. 2022. ABMS. <http://dx.doi.org/10.4322/cobramseg.2022.0957>. Disponível em:

https://web.archive.org/web/20221026035934id_/https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/cobramseg.2022.0957.pdf. Acesso em: 16 set. 2023.

SILVA, W. M. da; BIANCHINI, A.; CUNHA, C. A. da. Modeling and correction of soil penetration resistance for variations in soil moisture and soil bulk density. **Engenharia Agrícola**, [S.l.], v. 36, n. 3, p. 449-459, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v36n3p449-459/2016>.

SIMON, C. da P. *et al.* Soil quality literature in Brazil: A systematic review: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.l.], v. 46, p. 1-21, fev. 2022. Revista Brasileira de Ciencia do Solo. <http://dx.doi.org/10.36783/18069657rbcS20210103>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/YRDP7rR87cb339W8DNfY35d/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 21 jun. 2023.

SIRSAT, M. S. *et al.* Automatic prediction of village-wise soil fertility for several nutrients in India using a wide range of regression methods. **Computers And Electronics In Agriculture**, [S.l.], v. 154, p. 120-133, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169917311006>. Acesso em: 21 jun. 2023.

SPLETOZER, A. G. *et al.* Surface runoff from an area undergoing soil rehabilitation after bauxite mining in southeastern Brazil. **Land Degradation & Development**, [S.l.], v. 32, n. 9, p. 2715-2725, 10 abr. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.3948>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.3948>. Acesso em: 20 fev. 2023.

TEUTSCHEROVÁ, N. *et al.* Intensive short-duration rotational grazing is associated with improved soil quality within one year after establishment in Colombia. **Applied Soil Ecology**, [S.l.], v. 159, p. 103835, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103835>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139320307642>. Acesso em: 29 jun. 2023.

TRIPATHI, M.; SINGAL, S. K. Use of Principal Component Analysis for parameter selection for development of a novel Water Quality Index: a case study of river ganga india. **Ecological Indicators**, [S.l.], v. 96, p. 430-436, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.025>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X18307003>. Acesso em: 20 dez. 2022.

VASQUES, N. C. *et al.* Resposta da biomassa microbiana a diferentes corretivos de solo. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S.l.], v. 11, n. 7, p. 161-169, 10 ago. 2020. Companhia Brasileira de Produção Científica. <http://dx.doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2020.007.0015>. Disponível em: <https://sustenere.co/index.php/rca/article/view/CBPC2179-6858.2020.007.0015/2407>. Acesso em: 21 jun. 2023.

WU, H. *et al.* Long term natural restoration creates soil-like microbial communities in bauxite residue: a 50-year field study. **Land Degradation & Development**, [S.l.], v. 32, n. 4, p. 1606-1617, 16 jan. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.3728>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.3728>. Acesso em: 10 ago. 2023.

XAVIER, L. H. *et al.* Sustainability and the circular economy: a theoretical approach focused on e-waste urban mining. **Resources Policy**, [S.l.], v. 74, p. 101467, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101467>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301420717305433>. Acesso em: 05 fev. 2023.

YANG, Y. *et al.* Detecting the dynamics of vegetation disturbance and recovery in surface mining area via Landsat imagery and LandTrendr algorithm. **Journal Of Cleaner Production**, [S.l.], v. 178, p. 353-362, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.050>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618300611>. Acesso em: 21 jun. 2023.

YAO, Z. *et al.* Geological features and resources potential of bauxite in Latin America[J]. **Geological Bulletin of China**, 2017, 36(12): 2107-2115.

YU, P. *et al.* Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China. **Science Of The Total Environment**, [S.l.], v. 616-617, p. 564-571, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.301>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896971733019X>. Acesso em: 21 jan. 2023.

ZERAATPISHEH, M. *et al.* Assessing the effects of deforestation and intensive agriculture on the soil quality through digital soil mapping. **Geoderma**, [S.l.], v. 363, p. 114139, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114139>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706119311577>. Acesso em: 21 jun. 2023.

ZHANG, L. *et al.* Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. **Catena**, [S.l.], v. 128, p. 44-53, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.016>.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Dados de campo

Tabela A1 - Valores dos atributos físicos, químicos e biológicos dos solos.

		PS1	PS2	PS3	PC1	PC2	PC3	ES1	ES2	ES3	EC1	EC2	EC3	NS1	NS2	NS3	NC1	NC2	NC3
Físicos	Argila (%)	53,8	52,9	49,2	51,7	57,2	52,9	73,6	64,9	60,7	47,4	41,1	44,3	72,7	73,6	75	64,2	66,7	65
	Areia (%)	32,5	33,06	33,67	30,06	31,21	31,37	25,7	26,87	27,47	28,81	35,27	29,7	6,63	6,3	6,22	16,21	12,53	10,83
	RP (kPa)	2708	2992	3097	3406	3213	3285	3561	3659	3273	2924	2949	2476	2615	2899	3158	2039	3039	3516
	Tie (mm/h)	150	150	120	150	180	180	80	90	100	600	540	540	210	210	180	600	540	540
	ρ (g/cm³)	1,09	1,1	1,11	1,31	1,25	1,31	1,17	1,22	1,2	1,14	1,19	1,11	0,74	0,76	0,88	0,83	0,87	0,95
	Ma (m³/m³)	0,07	0,04	0,02	0,06	0,15	0,07	0,07	0,08	0,11	0,28	0,21	0,23	0,17	0,18	0,07	0,19	0,17	0,2
	Pt (m³m⁻³)	0,52	0,52	0,52	0,49	0,51	0,49	0,54	0,52	0,53	0,54	0,52	0,56	0,64	0,62	0,56	0,61	0,6	0,55
Químicos	MO (g/dm³)	25	29	26	19	23	20	25	27	29	23	26	23	39	41	43	29	24	25
	pH (CaCl₂)	4,8	4,8	4,8	5,1	4,8	4,9	4,4	4,4	4,3	5,7	5,3	5,8	3,9	4,1	4	4,2	4,2	4,3
	P (mg/dm³)	3	3	2	3	3	2	4	5	4	3	3	3	3	2	2	2	4	2
	K (mmolc/dm³)	2	2	1,7	1	1,2	0,9	0,9	1	0,8	1,1	1,5	0,9	2	1,8	1,7	1,3	1,4	1,6
	Ca (mmolc/dm³)	14	14	13	10	12	9	10	13	10	25	23	22	3	2	2	6	8	7
	Mg (mmolc/dm³)	8	7	7	5	5	4	5	7	6	17	15	14	2	2	2	4	4	3
	Al Trocável (mmolc/dm³)	0	0	0	0	0	0	5	3	6	0	0	0	14	13	12	2	4	6
	S (mg/dm³)	6	5	5	11	14	13	10	8	9	9	8	10	6	5	5	8	5	7
	B (mg/dm³)	0,14	0,14	0,18	0,1	0,1	0,1	0,13	0,1	0,11	0,1	0,1	0,1	0,1	0,11	0,1	0,13	0,1	0,1
	Cu (mg/dm³)	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Fe (mg/dm³)	52	57	55	19	18	17	40	43	41	18	20	18	39	35	36	39	35	36	

	Mn (mg/dm ³)	2,8	3,1	2,6	1,6	1,5	1,5	2,4	2,9	2,3	1,6	1,5	1,4	9,9	8,8	9,4	7,8	7,5	7,3
	Zn (mg/dm ³)	3	3,1	3,8	2,5	3,1	1,4	3,7	3,2	3,8	3	2,6	2,4	4,8	5	4,7	2,6	2,9	2,4
Biológicos	β-G (ρ nitrofenol g-1 solo h-1)	71	75	72	180	200	195	65	72	73	175	178	170	67	70	68	190	150	160
	FA (ρ nitrofenol g-1 solo h-1)	720	740	730	790	800	795	600	650	689	780	792	790	630	700	675	852	810	820
	Ars (ρ nitrofenol g-1 solo h-1)	45	51	49	78	81	79	41	40	43	83	82	79	40	42	38	83	81	80

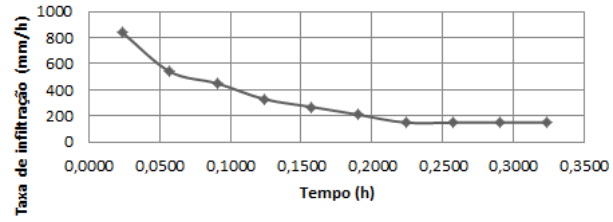
PS = Pastagem não Minerada; PC = Pastagem Reabilitada; ES = Eucalipto não Minerado; EC= Eucalipto Reabilitado; NS = Nativa não Minerada; NC = Nativa Reabilitada; Mg = Magnésio; Ca = Cálcio; pH = Potencial Hidrogeniônico; Ma = Macroporosidade; Mn = Manganês; Ars = Arilsulfatase; FA = Fosfatase Ácida; β-G = β – Glicosidade; Zn = Zinco; MO = Matéria Orgânica; Al Trocável = Alumínio Trocável; Pt = Porosidade Total; ρ = Massa Específica do Solo; RP = Resistência do Solo à Penetração; Tie = Taxa de Infiltração Estável; S = Enxofre; B = Boro; Cu = Cobre; Fe = Ferro; K = Potássio; P = Fósforo.

Tabela A2 - Correção da resistência do solo à penetração em função do teor de umidade.

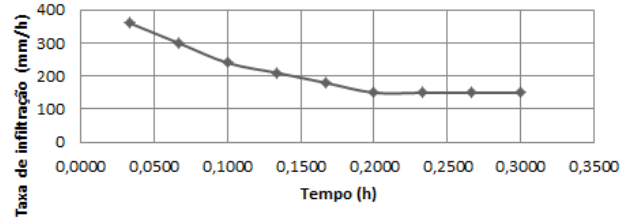
	PS1	PS2	PS3	PC1	PC2	PC3	ES1	ES2	ES3	EC1	EC2	EC3	NS1	NS2	NS3	NC1	NC2	NC3
RP medida em campo (kPa)	2707	2991	3097	3407	3213	3286	3561	3659	3272	2924	2952	2477	2615	2899	3158	2039	3039	3516
Teor de Umidade (%)	37,07	35,58	27,09	24,64	25,81	25,66	28,74	28,23	29,68	24,51	17,36	19,78	42,35	31,91	25,36	36,31	30,05	29,42
RP Corrigida (kPa)	2707,9	2991,8	3097	3405,6	3212,5	3285,2	3561,3	3659,3	3272,6	2923,6	2949,1	2475,9	2615	2899	3157,9	2039	3039	3516

PS = Pastagem não Minerada; PC = Pastagem Reabilitada; ES = Eucalipto não Minerado; EC= Eucalipto Reabilitado; NS = Nativa não Minerada; NC = Nativa Reabilitada; RP = Resistência do Solo à Penetração.

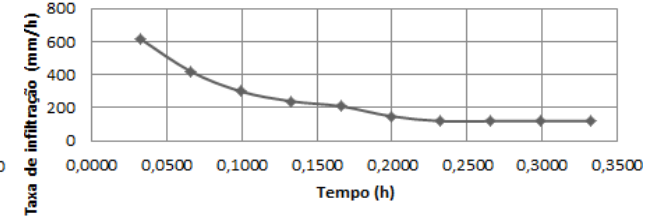
PS1



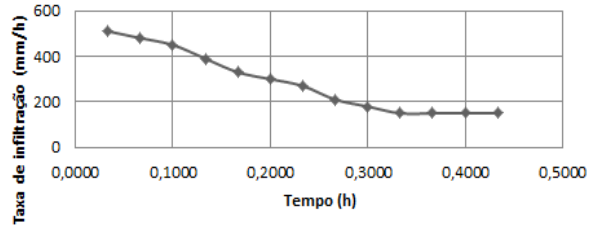
PS2



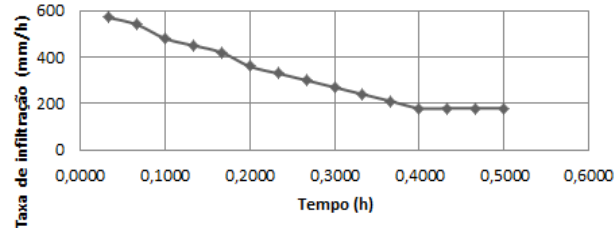
PS3



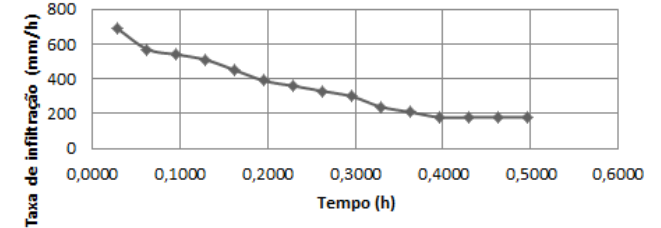
PC1



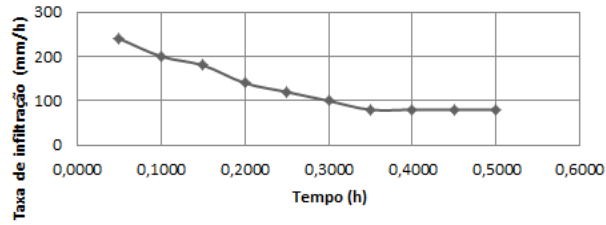
PC2



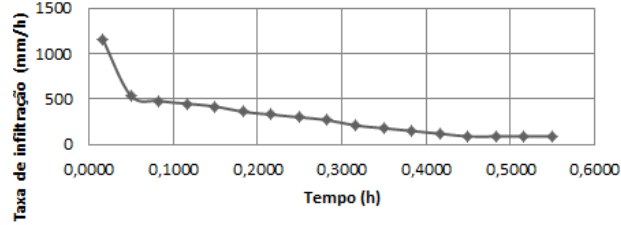
PC3



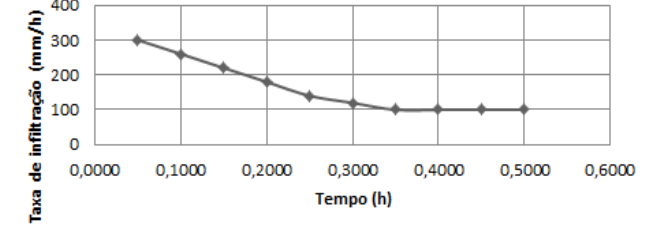
ES1



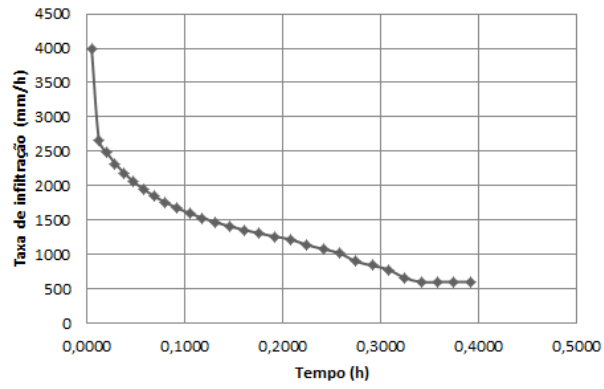
ES2



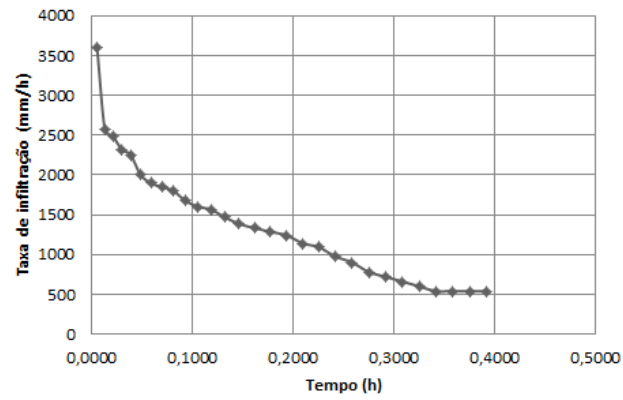
ES3



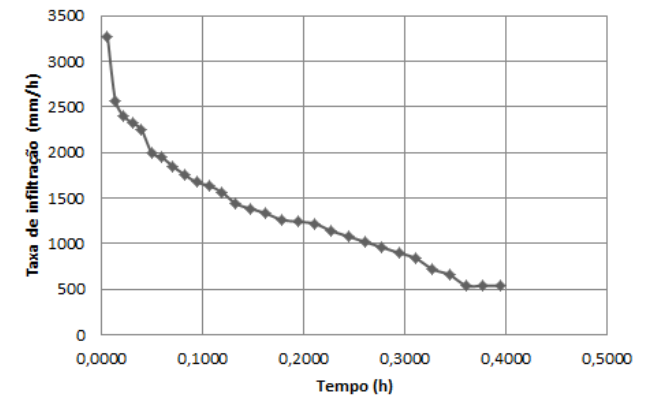
EC1



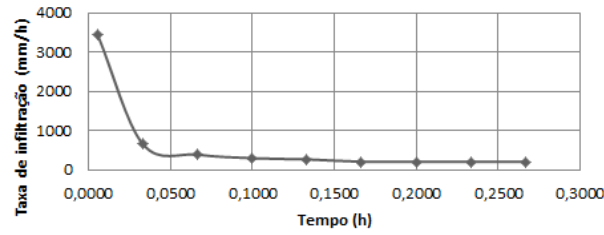
EC2



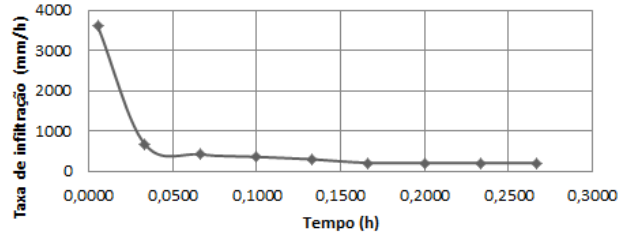
EC3



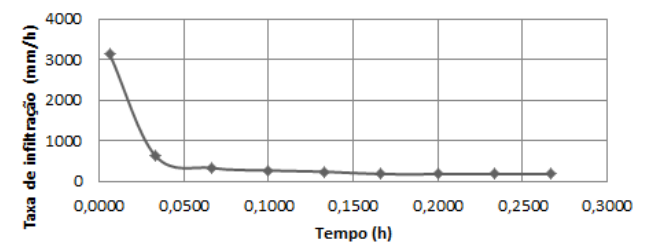
NS1



NS2



NS3



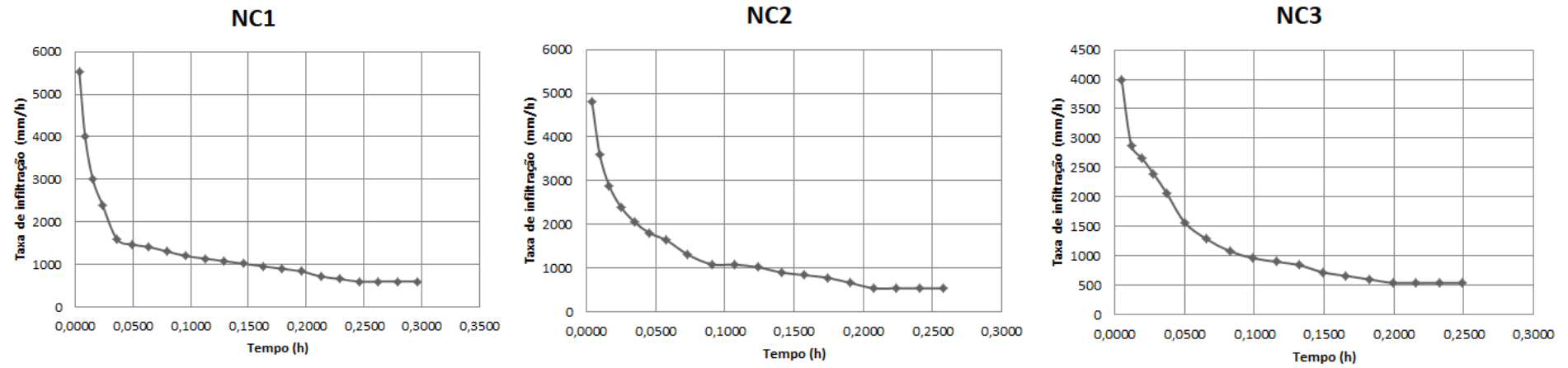


Figura A1 - Curvas de infiltração da água no solo.

PS = Pastagem não Minerada; PC = Pastagem Reabilitada; ES = Eucalipto não Minerado; EC= Eucalipto Reabilitado; NS = Nativa não Minerada; NC = Nativa Reabilitada.

APÊNDICE B – Área de estudo



Figura B1 - Áreas de Pastagem consideradas neste estudo: a) não minerada; e b) reabilitada.

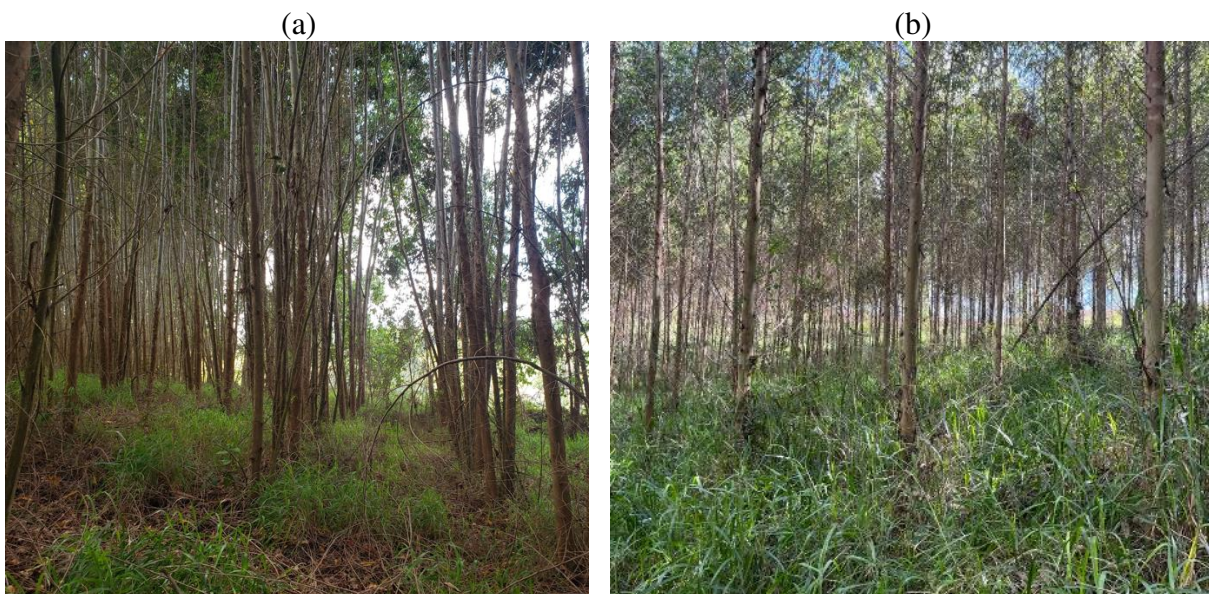


Figura B2 - Áreas de Eucalipto consideradas neste estudo: a) não minerada; e b) reabilitada.



Figura B3 - Áreas de Nativa consideradas neste estudo: a) não minerada; e b) reabilitada.