

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
MESTRADO EM ENGENHARIA MINERAL**

WAGNER SCHUSTER

**DIAGNÓSTICO DA QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE EXTRAÇÃO MINERAL DE
CALCÁRIO UTILIZANDO INDICADORES FÍSICOS E QUÍMICOS**

Caçapava do Sul

2023

WAGNER SCHUSTER

**DIAGNÓSTICO DA QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE EXTRAÇÃO MINERAL DE
CALCÁRIO UTILIZANDO INDICADORES FÍSICOS E QUÍMICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mineral.

Orientador: Pedro Daniel da Cunha Kemerich

Caçapava do Sul

2023

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

S395d Schuster, Wagner

DIAGNÓSTICO DA QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE
EXTRAÇÃO MINERAL DE CALCÁRIO UTILIZANDO INDICADORES
FÍSICOS E QUÍMICOS / Wagner Schuster.

77 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Pampa, MESTRADO EM ENGENHARIA MINERAL, 2023.

"Orientação: Pedro Daniel Kemerich".

1. Mineração. 2. Química do solo. 3. Calcário.
I. Título.

WAGNER SCHUSTER

**DIAGNÓSTICO DA QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE EXTRAÇÃO MINERAL DE
CALCÁRIO UTILIZANDO INDICADORES FÍSICOS E QUÍMICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 27 de abril de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Pedro Daniel da Cunha Kemerich

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Mateus Guimarães da Silva

UNIPAMPA

Prof. Dr. Willian Fernando de Borba

UFSM



Assinado eletronicamente por **Willian Fernando de Borba, Usuário Externo**, em 10/05/2023, às 21:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **PEDRO DANIEL DA CUNHA KEMERICH, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/06/2023, às 16:46, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MATEUS GUIMARAES DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/06/2023, às 16:50, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1117991** e o código CRC **C9FEE1D6**.

AGRADECIMENTO

Na elaboração deste trabalho contei com a colaboração de pessoas, laboratórios, e instituições de ensino que corroboraram para que o estudo fosse executado com sucesso, cumprindo com as atividades acadêmicas previstas e assim agradeço:

A Deus, que me traz força e me guia para caminhos certos.

A toda a minha família, dando-me força durante esta caminhada, em especial aos meus pais, pela educação que recebi e pelos exemplos de vida, aos meus irmãos que me acompanham por toda a vida, através da amizade e apoio incondicional.

Ao meu orientador Professor Pedro Daniel da Cunha Kemerich, por toda a disposição em ajudar, tanto em sala de aula, quanto nas saídas a campo, e orientações no laboratório de hidrogeologia, o que contribui significativamente para que este trabalho se realiza-se, além da sua amizade, de muitos anos.

Ao amigo Gabriel D'Avila Fernandes, pela saídas a campo, nas coletas das amostras, nos experimentos in loco, na interpretação dos resultados, e auxílio na organização e execução do trabalho.

Ao amigo Edberto Moura Lima pelas contribuições na interpretação das análises estatísticas.

A Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA/Campus Caçapava do Sul), pela oportunidade de cursar uma Pós-Graduação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal do Pampa, pela oportunidade de aprender com professores extremamente profissionais e competentes ligados ao PPGEM/UNIPAMPA.

Ao Departamento de Pesquisa, Extensão e Produção (DPEP) do Instituto Federal Farroupilha (IFFar – Campus São Vicente do Sul), por disponibilizar as instalações dos laboratórios para análises das amostras;

Aos responsáveis pelo Laboratório de Análise Química do Solo, e do Laboratório de Física do Solo, na realização das análises das amostras de solos.

RESUMO

O solo é um recurso natural fundamental para a conservação e desenvolvimento do meio ambiente e ecossistemas, ao mesmo tempo que apresenta importância na atividade econômica e industrial, através da extração e beneficiamento de minérios presentes no subsolo. Neste sentido, ainda são poucas as informações encontradas relacionadas à qualidade dos solos sob influência do processo de mineração da rocha calcária no município de Caçapava do Sul (RS), utilizando indicadores físicos e químicos como parâmetros de avaliação. Considerando que a variação das condições no fornecimento de água e nutrientes do solo são fatores que contribuem no crescimento das plantas, o objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade dos solos em três diferentes áreas e manejos, em uma empresa mineradora, utilizando indicadores físicos e químicos, quantificando os elementos nutrientes do solo nas condições físicas existentes, identificando o potencial de utilização da área de pilha de resíduos no desenvolvimento de espécies vegetais. As amostragens dos solos em cada área foram realizadas aleatoriamente e na profundidade de 0–20 cm, para a determinação dos atributos químicos de pH, matéria orgânica, teores de cálcio, magnésio, potássio e alumínio trocáveis, fósforo, zinco, cobre e manganês, determinando os valores de saturação por bases, capacidade de troca de cátions, e atributos físicos de granulometria, densidade e condutividade hidráulica do solo. Os resultados químicos obtidos foram interpretados através de valores utilizados na literatura, e relacionados a cultura de espécies florestais, e demonstraram que a análise da camada superficial do solo na área de mata nativa e plantio de eucalipto possuem melhores atributos químicos, além de condições físicas, portando uma vegetação bem desenvolvida e de maior equilíbrio natural, enquanto a área de rejeito com solo construído, existe maior restrição física e nutricional. Os solos das áreas apresentaram elevados valores de pH, saturação por bases e capacidade de troca de cátions, pouca disponibilidade de hidrogênio ácido no solo, e baixa concentração de alumínio na forma fitotóxica. Houve maior diferença em relação à matéria orgânica, fósforo, densidade e condutividade hidráulica na área nativa em relação aos solos construídos em pilha de resíduos. Existe uma forte relação entre MO e a CTC dos solos presente nas áreas mais conservadas. A determinação dos atributos permitiu quantificar os elementos químicos nutrientes disponíveis na camada superficial do solo, e sua disponibilidade na absorção pelas plantas, em determinadas condições físicas, demonstrando a qualidade destes solos do ponto de vista nutricional no desenvolvimento das plantas destas áreas.

Palavras-chave: cálcio; capacidade de troca de cátions; matéria orgânica; pilha de resíduos; saturação por bases.

ABSTRACT

Soil is a fundamental natural resource for the conservation and development of the environment and ecosystems, being at the same time important in economic and industrial activity, through the extraction and processing of ores present in the subsoil. In this sense, there is still little information found related to the quality of the soils under the influence of the limestone mining process in the municipality of Caçapava do Sul (RS), using physical and chemical indicators as evaluation parameters. Considering that the variation in conditions in the supply of water and soil nutrients is a factor that contributes to plant growth, the objective of this study was to evaluate the quality of soils in three different areas and managements in a mining company, using physical and chemical indicators, quantifying the nutrient elements of the soil in the existing physical conditions and identifying the potential use of the waste pile area in the development of plant species. Soil sampling in each area was carried out randomly and at a depth of 0–20 cm, to determine the chemical attributes of pH, organic matter, exchangeable calcium, magnesium, potassium and aluminum content, phosphorus, zinc, copper and manganese, determining the base saturation values, cation exchange capacity, and physical attributes of granulometry, density and hydraulic conductivity of the soil. The chemical results obtained were interpreted through values used in the literature, and related to the cultivation of forest species, and demonstrated that the analysis of the surface layer of the soil in the area of native forest and eucalyptus plantation have better chemical attributes, in addition to physical conditions, carrying a well-developed vegetation and greater natural balance, while in the tailings area with constructed soil, there are greater physical and nutritional restrictions. The soils in the areas showed high values of pH, base saturation and cation exchange capacity, low availability of acidic hydrogen in the soil, and low concentration of aluminum in the phytotoxic form. There was a greater difference in relation to organic matter, phosphorus, density and hydraulic conductivity in the native area in relation to soils built in a waste pile. There is a strong relationship between OM and soil CTC present in the most conserved areas. The determination of the attributes allowed to quantify the nutrient chemical elements available in the superficial layer of the soil, and their availability in the absorption by the plants, in determined physical conditions, demonstrating the quality of these soils from the nutritional point of view in the development of the plants of these areas.

Keywords: calcium; cation exchange capacity; organic matter; waste pile; base saturation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da empresa mineradora Dagoberto Barcellos.....	36
Figura 2 – Disposição de estéril e rejeitos.....	38
Figura 3 – (a) amostras após agitação com agente dispersante, e (b) amostras diluídas em água para decantação das frações do solo em TFSA.....	40
Figura 4 – (a) retirada da fração argila superficial por pipeta, e (b) lavagem peneiramento para retirada da fração areia.....	40
Figura 5 – Determinação da condutividade hidráulica do solo não saturado, com uso do permeâmetro de <i>Guelph</i>	42
Figura 6 – (a) coleta de amostra na área de mata nativa no ponto P3; e (b) coleta de amostra da área de pilha de estéreis e rejeitos no ponto P2.....	43
Figura 7 – Espectrofotômetro de UV/Vis.....	44
Figura 8 – (a) Preparação das amostras após agitação com solução extratora, e (b) análise de macronutrientes e micronutrientes.....	44
Figura 9 – Equipamento Espectrofotômetro de Absorção Atômica.....	45
Figura 10 – Determinação do alumínio trocável por titulação ácido-base.....	45
Figura 11 – Fotômetro de chama.....	47
Figura 12 – Caracterização dos parâmetros analisados, utilizando o Diagrama de Boxplot.....	69
Figura 13 – Correlação entre os teores de matéria orgânica (MO) e a capacidade de troca de cátions (CTC) para os solos no ponto P3 em área nativa.....	63
Figura 14 – Correlação entre os teores de argila e a capacidade de troca de cátions (CTC) para os solos no ponto P3 em área nativa.....	64
Figura 15 – Correlação entre os teores de matéria orgânica (MO) e a capacidade de troca de cátions (CTC) para os solos no ponto P2 em área de pilha de resíduos.....	64
Figura 16 – Correlação entre os teores de argila e a capacidade de troca de cátions (CTC) para os solos no ponto P2 em área de pilha de resíduos.....	65
Figura 17 – Correlação entre os teores de matéria orgânica (MO) e a capacidade de troca de cátions (CTC) para os solos no ponto P1 em área de plantio de eucalipto.....	65
Figura 18 – Correlação entre os teores de argila e a capacidade de troca de cátions (CTC) para os solos no ponto P1 em área de plantio de eucalipto.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classe de disponibilidade dos nutrientes e a faixa de valores limites em cada parâmetro na cultura de espécies florestais.....	49
Tabela 2 – Parâmetros físicos da fração percentual granulométrica, densidade aparente do solo e permeabilidade do solo não saturado, nas áreas de estudo.....	50
Tabela 3 – Valores dos parâmetros nos solos nas áreas de estudo, e classe de disponibilidade dos elementos conforme a cultura de espécies florestais.....	54
Tabela 4 – Resultados dos parâmetros avaliados nas áreas de estudo, no município de Caçapava do Sul, RS.....	55
Tabela 5 – Média dos parâmetros avaliados em cada solo.....	56
Tabela 6 – Concentrações dos cátions nas CTC efetiva e CTC pH 7,0 dos solos nas áreas de estudo.....	60
Tabela 7 – Porcentagem de saturação por bases (V%) e saturação por cátions ácidos (M%) no complexo de troca de cátions dos solos.....	60
Tabela 8 – Correlação de Pearson entre a capacidade troca catiônica (CTC ₇) com os coloides de argila e MO, e cátions trocáveis presente nos solos.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quantidade de recursos extraídos e depositados em pilhas de resíduos.....	37
--	----

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

PIB	Produto Interno Bruto
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
MO	Matéria orgânica do solo
Ca ²⁺	Cátion cálcio
Mg ²⁺	Cátion magnésio
K ⁺	Cátion potássio
Al ³⁺	Cátion alumínio
H ⁺	Cátion hidrogênio
Cu ²⁺ e Cu ⁺	Cátion cobre
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
HCl	Ácido clorídrico
KCl	Cloreto de potássio
NaOH	Hidróxido de sódio
UV/Vis	Ultravioleta visível
cmol _c /dm ³	Centimol carga por decímetro cúbico
mg/dm ³	Miligramas por decímetro cúbico
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
m ³	Metro cúbico
cm ³	Centímetro cúbico
m	Metro
mL	Mililitro
cm/s	Centímetro por segundo
mol/L	Mol por litro
%	Porcentagem
% m/v	Porcentagem em massa por volume
nm	Nanômetro
V%	Saturação por bases
M%	Saturação por cátions ácidos

m%	Saturação por alumínio
CTC	Capacidade de troca de cátions
CTC ₇	Capacidade de troca de cátions em pH 7,0
CTC _{efetiva}	Capacidade de troca de cátions efetiva
SB	Soma de bases
Ds	Densidade aparente do solo
k	Condutividade hidráulica não saturada
km	Quilômetro
km ²	Quilômetro quadrado
Λ	Comprimento de onda
°C	Graus Célsius
t	Tonelada
r	Coefficiente de correlação de Pearson
TFSA	Terra fina seca ao ar
[CaMg(CO ₃) ₂]	Calcário dolomítico
ROM	<i>run-of-mine</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVOS	18
2.1.	OBJETIVO GERAL	18
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1	MINERAÇÃO	19
3.2	SOLOS NA REGIÃO DE CAÇAPAVA DO SUL	21
3.3	INDICADORES FÍSICOS DE QUALIDADE DO SOLO	23
3.3.1	Textura do solo	23
3.3.2	Densidade	23
3.3.3	Permeabilidade do solo	23
3.4	INDICADORES QUÍMICOS DE QUALIDADE DO SOLO	24
3.4.1	Capacidade de troca de cátions do solo (CTC)	25
3.4.2	Saturação por bases (V%) e alumínio (m%).....	25
3.4.3	Acidez no solo	26
3.4.4	Matéria orgânica do solo (MO).....	27
3.4.5	Elementos fitotóxicos	27
3.4.6	Fósforo disponível	28
3.4.7	Cálcio e Magnésio	29
3.4.8	Potássio disponível	30
3.4.9	Micronutrientes (Mn, Zn e Cu)	30
3.4.10	Características química dos solos	31
3.5	QUALIDADE DO SOLO E OS INDICADORES QUÍMICOS E FÍSICOS.....	31
3.5.1	Espécies florestais.....	32
4.	METODOLOGIA	34
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	34
4.1.1	Caracterização do município de Caçapava do Sul - RS.....	34
4.1.2	Caracterização da empresa Dagoberto Barcellos	34
4.1.3	Características do clima, vegetação e solos das áreas	36
4.2	AMOSTRAGEM, ENSAIOS E DETERMINAÇÃO DOS RESULTADOS DAS AMOSTRAS DE SOLO	38
4.3	DETERMINAÇÃO DOS INDICADORES FÍSICOS DO SOLO	39

4.3.1	Determinação granulométrica textural e densidade aparente do solo (Ds).....	39
4.3.2	Ensaio de permeabilidade e determinação da condutividade hidráulica	41
4.4	DETERMINAÇÃO DOS INDICADORES QUÍMICOS DO SOLO	42
4.4.1	Ensaio dos parâmetros químicos do solo.....	42
4.4.2	Determinação do teor de matéria orgânica do solo (MO)	43
4.4.3	Determinação de Cálcio, Magnésio e Alumínio trocáveis	44
4.4.4	Determinação da acidez ativa do solo	46
4.4.5	Determinação da disponibilidade de fósforo e potássio	46
4.4.6	Determinação dos teores de micronutrientes Zn, Cu e Mn.....	47
4.4.7	Disponibilidade de nutrientes	47
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.2	PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO.....	50
5.2.1	Análise granulométrica	50
5.2.2	Densidade	51
5.2.3	Coefficiente de permeabilidade	52
5.3	PARÂMETROS QUÍMICOS DO SOLO	53
5.3.1	Análise de pH.....	57
5.3.2	Somas de bases (SB) e saturação por bases (V%)	58
5.3.3	Valores de CTC	60
5.3.4	Teor de matéria orgânica (MO).....	61
5.3.5	Relação entre CTC, argila e MO	62
5.3.6	Disponibilidade de Fósforo.....	67
5.3.6	Micronutrientes	68
6.	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS.....	72

1. INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural, formado por materiais minerais e orgânicos, contendo matéria viva fundamental para o funcionamento dos ecossistemas, fornecendo água e nutrientes essenciais as plantas.

Os recursos minerais naturais presentes no solo são utilizados como matéria-prima na atividade industrial, e neste sentido a mineração se caracteriza por utilizar estes recursos, contribuindo no crescimento e desenvolvimento econômico do país, porém intervindo na dinâmica do espaço ambiental durante um longo prazo, com potencial de degradar o meio físico local, principalmente o solo, gerando grandes quantidades de estéril e rejeitos produzidos na lavra do minério, demandando áreas para sua deposição segura.

O município de Caçapava do Sul se destaca pela extração e beneficiamento de rocha calcária, com produção de 85% do calcário dolomítico no Estado do Rio Grande do Sul (SANTOS, 2015), e devido à grande demanda deste minério, suas atividades podem trazer consequências ao meio ambiente, sendo necessário o emprego de procedimentos para a recuperação das áreas afetadas pela mineração, através de processos que exigem permanente monitoramento.

A recuperação de áreas ambientalmente alteradas, gera condições para o restabelecimento de complexas relações ecológicas entre solo, plantas, animais e microclima, contribuindo no reequilíbrio dinâmico da natureza nesta áreas (REIS, ZAMBONIN E NAKAZONO, 1999), restabelecendo as estruturas e as funções ecológicas que havia no ecossistema, antes da degradação.

Para quantificar os danos, ou o andamento da recuperação do solo, a escolha de atributos como indicadores de qualidade do solo, deve levar em conta os níveis críticos desses parâmetros escolhidos, sendo definida como a capacidade de um tipo específico de solo funcionar, dentro de limites dos ecossistemas naturais ou manejados, sustentando a produtividade das plantas e animais, mantendo ou melhorando a qualidade da água e do ar (KARLEN, 1997).

Os ecossistemas naturais apresentam uma integração entre a cobertura vegetal nativa e os elementos químicos presentes no solo, decorrente de processos de acúmulo e decomposição da matéria orgânica e ciclagem dos nutrientes, associados as condições físicas do solo. Desta maneira, a identificação das modificações químicas e físicas do solo, causadas pela atividade de mineração, pode fornecer subsídios para a adoção de práticas de manejo que permitam a melhor recuperação de uma área transformada, através do desenvolvimento de características mais próximas possíveis da original, com a continuidade do ecossistema no entorno das

atividades de mineração. Algumas práticas na recuperação de áreas degradadas, se referem a utilização de plantas de cobertura, que adicionam quantidades de fitomassa ao solo, proporcionando o aumento gradativo da matéria orgânica do solo, desempenhando papel fundamental na ciclagem de nutrientes (PEREIRA et al., 2010), na melhoria da infiltração, armazenamento da água da chuva e aumento da concentração de elementos nutrientes no solo, melhorando o desenvolvimento da vegetação local.

Trabalhos em áreas de extração de calcário utilizando indicadores químicos e físicos de qualidade do solo ainda são escassos, e com base nesse aspecto, o presente trabalho avaliou a qualidade do solo, em áreas próximas a cavas de extração de calcário em uma empresa mineradora no município de Caçapava do Sul (RS), e área próxima sem a influência do processo de mineração, utilizando estes indicadores, que através de parâmetros escolhidos medem as condições nutricionais do solo através do conhecimento do teor de nutrientes presentes em condições de serem absorvidos pelas plantas, em certas condições físicas presentes.

Desta forma, caracterizou-se as diferenças na capacidade dos solos em fornecer quantidades suficientes e assimiláveis de nutrientes às plantas, indicando sobre deficiências e excessos de nutrientes devido ao manejo realizado no solo, através de diferentes resultados encontrados nos parâmetros dos indicadores químicos e físicos, demonstrando a situação das áreas de mata preservada, área com plantio de eucalipto, e área da pilha com descarte de resíduos.

Também demonstra o potencial de utilização das áreas dos resíduos para desenvolvimento de espécies vegetais, garantindo a contínua sustentabilidade e conservação dos ecossistemas, após a recomposição topográfica do local.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Caracterizar os parâmetros físicos e químicos que auxiliem como indicadores de qualidade do solo, em áreas ocupadas por mineração.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar fisicamente e quimicamente os solos em diferentes usos;
- Avaliar a qualidade dos solos em diferentes usos por meio de indicadores físicos e químicos; e
- Identificar o potencial de utilização das áreas de rejeito para desenvolvimento de espécies vegetais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MINERAÇÃO

A Mineração é uma atividade importante e positiva para a economia global, contribuindo de forma direta para o desenvolvimento da sociedade, sendo a base das cadeias produtivas através da extração de compostos minerais de grande valor econômico.

O subsolo brasileiro é rico em minérios a nível mundial, impulsionando grandes oportunidades econômicas ao país, representando de 3% a 5% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil (IBRAM, 2013), setor responsável por 20% das exportações brasileiras e por 1 milhão de empregos diretos (MME, 2010).

Apesar de a extração mineral ainda ser considerada uma atividade geradora de grandes mudanças e impactos no solo e meio ambiente local, devido a degradação da paisagem, desmatamento da flora natural, compactação do solo, geração de resíduos e disposição inadequada de rejeitos, existem atualmente, entre as empresas, práticas que visam a minimizar os impactos causados pelas modificações do solo, e segundo Oliveira Júnior (2001) a exploração do solo pelas mineradoras está se tornando uma atividade temporária local, e não mais uma atividade final para o solo, avaliando a sua qualidade ou degradação no início, durante e após o encerramento das atividades mineiras.

A lavra a céu aberto, característico das áreas de mineração do calcário, ocorre com supressão da vegetação original, devido a sua remoção junto as rochas que estejam acima dos depósitos minerais, com mistura de solos das diferentes camadas superficiais e perfis geológicos, com mudanças na topografia e paisagem local. A deposição do estéril em pilhas ou cavas extintas, camadas denominadas de “solos construídos” (OLIVEIRA JÚNIOR, 2001), tem como uma das etapas do processo de mitigação a sua revegetação, através do desenvolvimento de uma cobertura vegetal mais próximo possível das espécies típicas da região (FONTES, 1991).

Em virtude das mudanças nas características originais do solo, pode ocorrer a remoção ou alterações de elementos químicos (EMBRAPA, 2017), impondo limitações na qualidade nutricional do solo, e na recuperação de áreas pós-mineradas, com prejuízo ao desenvolvimento da vegetação de cobertura.

A legislação brasileira, conforme a Resolução CONAMA 001/86 (BRASIL, 1986), recomenda a obrigatoriedade da recuperação de áreas degradadas devido a extração de recursos

naturais, passando pela recomposição topográfica e paisagística, assim como pela reconstrução do solo, a fim do restabelecimento do equilíbrio ecológico.

No planejamento de recuperação de um solo degradado, existe a questão do restabelecimento das condições originais da camada superficial e subsuperficial, tornando o ambiente favorável às atividades agrícolas e/ou paisagísticas (CENTRAL FLORESTAL, 2019).

Em áreas pós-mineradas e recuperadas, tem-se usado na cobertura das camadas superficiais, solos já existentes que, contenham maior quantidade de nutrientes e Matéria Orgânica (MO) (DIAS & GRIFFITH, 1998), com imediata transferência destas camadas da área a ser minerada para outra a ser recuperada, minimizando as perdas microbiais e de nutrientes, maximizando o número de plantas e sementes que sobrevivem a esta ruptura provocada (FONTES, 1991). Em áreas onde a quantidade de solo é insuficiente, torna-se necessária a utilização de outros materiais e solos com diferentes características químicas, para o recobrimento das pilhas (SILVA, 2006), sendo assim, o tratamento agrônômico deste solo, através da utilização e auxílio da análise química, uma das etapas da recuperação destas áreas mineradas.

Na mineração de calcário o método de lavra empregado é a céu aberto, com remoção do capeamento superficial dos solos, desmonte da bancada e remoção de rochas e minério, com formação de dois tipos de resíduos resultantes do processo de extração e beneficiamento mineral, que segundo Silva (2007), são os provenientes dos materiais escavados pelo decapeamento da mina (estéreis) sem valor econômico, e os rejeitos resultantes após processo de beneficiamento da rocha calcária.

O estéril que compõe a pilha de resíduos e utilizado na recuperação da cava já exaurida, é composto de diversos materiais contendo solo orgânico, fragmentos do mineral calcário e por minérios sem interesse econômico, com granulometria variada, desde argila e areia até matacos, como granitos, silicatos, gnaisses, xistos, diabásicos, quartzito feldspático e calcários impuros, que são depositados em cavas de frente de lavra já exauridas (BAPTISTA, 2015), e segundo Bates (2002) está é uma característica inerente deste tipo de construção do solo, pois não existe um maior controle granulométrico nos desmontes do processo de decapeamento.

Após o beneficiamento e separação do calcário, o que sobra do processo são os rejeitos, compostos por minerais inaproveitáveis que são separadas pelo nos processos de britagem, moagem e peneiramento, materiais estes que não atendem as especificações do produto, podendo ser frações de rochas não calcárias, variando a granulometria entre 20 mm a frações argila, os quais são carregados em caminhões e transportados para as áreas de bota-fora ou pilha

de rejeitos (BAPTISTA, 2015), onde são recoberto por uma camada de solo superficial, retirado de algum local próximo, cuja espessura depende de sua disponibilidade em cada mina.

Para minimizar os problemas ambientais, após a mineração os estéreis e rejeitos devem ser realocados no local de origem, preparados para recebê-los de forma segura, minimizando impactos ambientais que possam provocar nos solos.

3.2 SOLOS NA REGIÃO DE CAÇAPAVA DO SUL

Os solos que abrangem a região do município de Caçapava do Sul pertencem a Unidade Fisiográfica do Escudo Sul-Riograndense, composta por relevos ondulados e fortemente ondulados como serras e vales com altitudes de 100 a 450 m, composta por rochas cristalinas intrusivas, predominantemente de origem granítica, e suas correspondentes metamórficas e ígneas, extremamente resistentes, e de nível elevado na paisagem através de afloramentos rochosos, com perfis mais desenvolvidos nas bordas do Escudo, áreas formadas por rochas sedimentares, representadas predominantemente por arenitos (BRASIL, 1973).

A presença do granito, através da intemperização e decomposição, origina solos com fração predominante de areia e pobres em argila, de aspecto grosseiro e bem drenado, com baixa capacidade de reter água, coloração mais clara e acinzentada em função da cor da matéria orgânica e silicatos.

Encontram-se solos do tipo Neossolos Litólicos Distróficos, com baixo grau de desenvolvimento pedogênico devido a horizontes pouco evoluídos e rasos, de pequenas profundidades, entre 20 a 50 cm até o substrato rochoso, com horizonte A (superficial) diretamente sobre o horizonte C (rocha de origem) preservadas ou pouco alteradas, sendo a transição entre perfis abrupta e irregular, normalmente associados a relevos mais declivosos. (BRASIL, 1973; EMBRAPA, 2021).

Os solos possuem textura média (Franco argilo arenoso) e porcentagens elevadas das frações de areia, presença de calhaus, matacões e rochosidade, solos bem drenados e baixa capacidade de reter água, fatores limitantes do crescimento radicular.

Quimicamente possuem baixa a média fertilidade natural, de substrato granítico, ácidos e deficiência em nutrientes, com problemas de toxidez para as plantas devido a disponibilidade do Al, e médio valores de V% (BRASIL, 1973), médios valores de MO devido ao solo pedregoso e arenoso, com cobertura rala de gramíneas e pequenos arbustos, entretanto, na

encosta da mata nativa há matéria orgânica em maior quantidade depositadas pela mata (ZANETTI e FERREIRA, 2017).

Encontra-se também solos lateríticos, originados a partir de granitos, com a presença dos minerais de óxidos de ferro e alumínio, conferindo ao solo uma coloração vermelho-amarelado e marrom-alaranjado, são moderadamente desenvolvidos e profundos, com horizonte A (superficial) de profundidade em torno de 40 cm, com transição difusa e plana para o B, e presença do horizonte C (material de origem parcialmente decomposto), ocorrem em relevos ondulados e pequenas depressões, e em menores altitudes.

Apresentam solos superficiais porosos e bem drenados, de textura média (Franco argilosa), com presença de cascalhos, e com o mineral quartzo encontrado com muita frequência e predominante na fração areia, formados a partir da lixiviação que ocorre pelo excesso de chuvas e das temperaturas do clima tropical úmido, carregando os nutrientes mais solúveis do solo, exceto minerais de ferro e alumínio menos solúveis. (BRASIL, 1973; ATLAS ECONÔMICO RS, 2022). Do ponto de vista químico, são solos ácidos, com presença de Al trocável no horizonte A, apresentam médios valores de V% e baixa soma de bases de Ca, baixos teores de MO, e bons valores de K.

Os dois tipos de solos desta região, apresentam pobreza de bases trocáveis (Ca e Mg) e $V\% < 50\%$ da CTC, sendo o restante preenchido pelos cátions ácidos de H^+ e Al^{3+} e consequentemente médios valores de m%, típico de solos ácidos e pouco férteis, característico da grande maioria dos solos nativos do Brasil.

Devido as características do relevo e dos solos desta região, existe limitações ao uso agrícola ou urbano/industrial por serem pouco desenvolvidos, de pouca profundidade e grande pedregosidade, com afloramentos rochosos, e relevos ondulados a montanhosos, suscetíveis aos processos erosivos não aptos ao uso exigido da mecanização. As regiões de relevo forte ondulado e áreas muito íngremes devem ser reservadas para preservação permanente e reflorestamento, com plantio de espécies arbóreas (BRASIL, 1973). As atividades florestais para fins comerciais, restringem-se ao cultivo do eucalipto e acácia-negra, que servem para as indústrias de calcário, para a produção de celulose e como subsistência nas propriedades rurais, indicando tendência futura de atividade agrícola nas formações campestres locais (EMATER, 2013).

3.3 INDICADORES FÍSICOS DE QUALIDADE DO SOLO

Os indicadores físicos estão relacionados ao arranjo das partículas e do espaço poroso do solo, e alterações nas propriedades dos indicadores de textura, densidade, permeabilidade e condutividade hidráulica, geram resistência física ao crescimento das raízes (JIMENEZ et al., 2008), limitando a permeabilidade da água e nutrientes no perfil do solo (FREDDI et al., 2007).

3.3.1 Textura do solo

A textura do solo indica a proporção relativa das partículas de argila, silte e areia na fração terra fina seca (TFSA) do solo, influenciando na dinâmica da adesão e coesão entre estas partículas, influenciando na estrutura do solo, densidade, retenção e transporte de água, nutrientes e MO, além de influenciar fortemente os processos erosivos do solo (FELLER e BEARE, 1997), sendo que solos de textura mais arenosa devido à baixa capacidade de retenção de água, possuem maior tendência a lixiviação de cátions, e menor CTC, MO e disponibilidade de nutrientes (LOPES, 1998).

As partículas classificam-se conforme NBR 6502/95, com base no diâmetro, em frações de argila (menores que 0,002 mm), silte (0,002 a 0,06 mm) e areia (0,06 a 2,0 mm).

3.3.2 Densidade

A Densidade aparente (D_s) representa o volume do solo, incluindo os espaços ocupados pela água e pelo ar (FERREIRA, 2010), e sua determinação é recomendada em praticamente todos os tipos de levantamentos de manejo (IBGE, 2007), e por estar diretamente relacionada à estrutura do solo, qualquer intervenção com modificação na disposição nas partículas altera a consistência e a estrutura do solo, alterando a densidade, e conseqüentemente o desenvolvimento de raízes (FERREIRA, 2010), reduzindo a capacidade de armazenamento de água e nutrientes disponíveis, características de solos de texturas finas e muito argiloso ou muito arenosos facilmente compactados.

3.3.3 Permeabilidade do solo

A permeabilidade do solo através da infiltração definem a capacidade que os solos oferecem à passagem de água e nutrientes através de seus poros (ALONSO, 1999), representado

numericamente pelo coeficiente de permeabilidade. Este coeficiente representado pela condutividade hidráulica (K) não saturada, possui relação com a textura do solo, assim como o tamanho e arranjo das partículas, porosidade, densidade, grau de compactação, caracterizando como o fluido escoará em camadas mais profundas do solo (CABRAL, 2008), na qual a zona radicular está inserida, contribuindo nas relações entre as fases sólida, líquida e gasosa e a solução (água e nutrientes).

A textura, assim como a densidade das partículas, interferem no volume dos solos, em que os poros de maior volume, atuam na drenagem e aeração do solo, fazendo com que a condução de água pelo solo decresça rapidamente, enquanto que poros de menor tamanho, retenham mais a água no solo, proporcionando uma condução mais lenta, proporcionando maior disponibilização de água e nutrientes para as plantas (BRADY, 1979). Sendo assim, quanto menor forem os vazios do solo e menores as suas partículas, menor será o coeficiente de permeabilidade (KIEHL, 1979).

A principal maneira de avaliar a condutividade hidráulica de um solo sob condição natural e não saturado, é através do permeâmetro de *Guelph*, instrumento que permite a quantificação da condutividade hidráulica *in situ* através de carga constante, onde a carga da coluna d'água varia com o tempo (CELLIGOI, et al., 2006).

3.4 INDICADORES QUÍMICOS DE QUALIDADE DO SOLO

As propriedades químicas dos solos são significativamente modificadas com a retirada da vegetação natural, e podem ser medidas por parâmetros apropriados, avaliando as condições químicas, detectando alterações e definindo medidas a serem adotada na recuperação (MELLONI, 2007; SILVA, 2020).

Os indicadores químicos do solo são agrupados em variáveis relacionadas ao teor de acidez, MO, micronutrientes, elementos fitotóxicos e determinadas relações como a saturação por bases (V%) e alumínio (m%) (ARAÚJO, 2012), parâmetros estes que expressam a disponibilidade de nutrientes, como a soma de bases ($SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+$), e alumínio trocável (Al^{3+}), e suas relações, avaliando a qualidade de solo entre diferentes sistemas de manejos (ARAÚJO, 2012), indicando a disponibilidade dos elementos no solo, em condições de serem absorvidas pelas raízes das plantas.

Em florestas nativas degradadas, estes atributos químicos são considerados importantes indicadores de qualidade nos planos de restauração e produtividade florestal, visando principalmente o foco do restabelecimento das suas funções originais (ROCHA et al., 2015).

3.4.1 Capacidade de troca de cátions do solo (CTC)

A CTC representa a quantidade de cargas negativas dos coloides de argila e MO, ligadas a cátions permutáveis de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Al^{3+} e H^+ , podendo ser retidos e liberados no solo, favorecendo a manutenção da fertilidade por um período prolongado, e disponibilizando os nutrientes na solução para assimilação pelas plantas (EMBRAPA, 1997; LOPES, 1998). É medido através da CTC_7 ($\text{SB} + \text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) medido em pH 7,0, e CTC efetiva ($\text{SB} + \text{Al}^{3+}$) no pH natural. A diferença entre as duas se refere a quantidade de cátion representados pelo íon H^+ que podem ser neutralizados por íons oriundos de calagem como o OH^- .

Os elementos Ca e Mg são os principais nutrientes do complexo de troca de cátions, em solos sem excesso de acidez, representando 70% a 95 % das bases, condições ideais para o desenvolvimento das plantas (MALAVOLTA, 2006), enquanto que solos ácidos e pobres, contém cátions H^+ e Al^{3+} em maiores quantidades na CTC, diminuindo a disposição de bases nutrientes para as plantas.

3.4.2 Saturação por bases (V%) e alumínio (m%)

Parâmetros indicativos das condições gerais de fertilidade do solo, sendo a V% medida pela soma das bases (SB) trocáveis de Ca, Mg e K, expressos em porcentagem, e ocupando os pontos de troca de cátions básicos do complexo coloidal do solo (Equação 1), em relação aos pontos de troca dos cátions ácidos de H^+ e Al.

A saturação por alumínio (m%), representa a porcentagem das cargas negativas dos coloides do solo na CTC que estão ocupados por SB e o Al^{3+} (Equação 2) expressando a toxidez do alumínio ao desenvolvimento das plantas (RONQUIM, 2020).

Solos com $\text{V}\% \geq 50\%$ são considerados férteis (“Eutróficos”), ricos em nutrientes, com CTC armazenando mais da metade das SB, especialmente Ca, enquanto que solos com $\text{V}\% < 50\%$, são pouco férteis e pobres em bases (“Distróficos”), e solos com $\text{m}\% \geq 50\%$, são considerados muito pobres em nutrientes, com muita presença de alumínio, o que os caracterizariam como solos “álidos”.

O cálculo da V% foi realizado através da Equação 1.

$$V\% = (SB / CTC_7) \times 100 \quad (1)$$

Onde:

V% = Saturação por bases, em $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$;

SB = Soma de bases (Ca + Mg + K); e

$CTC_7 = (SB + Al^{3+} + H^+)$ medido em pH 7,0.

O cálculo da m% foi realizado através da Equação 2.

$$m\% = (Al^{3+}/CTC_{\text{efetiva}}) \times 100 \quad (2)$$

Onde:

m% = Saturação por alumínio, em $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$;

Al^{3+} = cátion alumínio trocável; e

$CTC_{\text{efetiva}} = (SB + Al^{3+})$ no pH natural.

Assim, conhecendo-se o valor da V%, podemos determinar a percentagem de saturação por cátions ácidos (M%):

$$M\% = 100 - V\% \quad (3)$$

3.4.3 Acidez no solo

A acidez dos solos ocorre naturalmente pela intemperização e decomposição do material de origem da rocha, com lixiviação das bases de Ca, Mg e K do complexo de troca catiônica, e substituição por H^+ e Al^{3+} na forma livre e liberados na solução do solo (RAIJ, 2011).

A medida do valor de pH é a forma mais simples de expressar a acidez do solo, através da maior ou menor concentração de H^+ na solução (LUCHESE et al., 2002), sendo medido em suspensão solo-água, e representa de acordo com Brady (2009) a acidez ativa, enquanto a acidez potencial representa a concentração de íons H^+ e Al^{3+} adsorvidos nos coloides do solo, também chamada “acidez nociva” as plantas.

Solos com acidez elevada e baixos valores de pH prejudicam a disponibilidade dos nutrientes, devido a pobreza em bases de Ca e Mg e baixa V%; elevado teor de Al; excesso de Mn; alta fixação de fósforo nos coloides do solo; tendência de lixiviação de K, e deficiência de alguns micronutrientes (LOPES et al., 1991).

O valor ideal de pH para a nutrição de plantas encontra-se entre 5,6 a 6,2, faixa de valor em que a maioria dos nutrientes possuem formas solúveis, sendo assim passíveis de serem absorvidos pelas raízes, precipitando íons tóxicos como o Al, tornando-os indisponíveis para absorção pelas plantas. (DIAS, 1998).

3.4.4 Matéria orgânica do solo (MO)

Indicador de qualidade do solo, a MO contribui com macro e micronutrientes no solo, formado por compostos orgânicos, resíduos vegetais e húmus em decomposição, sendo fonte de carbono para o solo (JUMA 1999; BRADY, 1999).

Possui propriedades coloidais, com alta reatividade, regulando através da retenção e disponibilidade de cátions de Ca, Mg, e K, elevando a CTC do solo, e evitando que estes sejam lixiviados através da solução do solo, solubilizando outros nutrientes como fósforo (P) e nitrogênio (N) em solos minerais, e controlando a mobilidade de elementos fitotóxicos, e metais pesados (LOPES, 1998; RONQUIM, 2020).

A MO superficial, devido a cobertura vegetal e serrapilheira, mantém a qualidade física do solo, através da distribuição equilibrada das partículas de areia, silte e argila, melhorando a Ds devido ao armazenamento de água e ar nos poros, constituindo um meio ideal para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Solos com textura fina contêm mais MO, retendo água e nutrientes, e solos de maior granulometria são mais arejados, com decomposição mais rápida da MO pela presença do oxigênio.

A vegetação forma uma barreira ao impacto das águas da chuva, evitando enxurradas e protegendo o solo contra a erosão, e a remoção das camadas superficiais do solo, ocasionando menores perdas de MO (GISMONTI, 2010).

3.4.5 Elementos fitotóxicos

Elementos presentes em solos ácidos com pH inferior a 5,7 e baixa V%, limitando o desenvolvimento da planta, com Al^{+3} em maiores quantidades em solos de baixa CTC, substituindo o Ca e Mg na absorção pelas raízes das plantas. Quando na forma livre e na solução

do solo, prejudicam o desenvolvimento radicular por inibir o alongamento do eixo principal da raiz, reduzindo suas ramificações laterais mais finas, prejudicando a absorção de água e nutrientes no perfil do solo pelas plantas, inibindo a divisão celular e o seu crescimento (MALAVOLTA, 2006).

O manganês (Mn) é um micronutriente essencial para as plantas, mas em solos ácidos com pH ao redor de 5,0 e baixa V%, favorece o acúmulo de concentrações fitotóxicas nas plantas, afetando mais a parte aérea da planta do que as raízes, devido ao seu transporte em quantidades excessivas, acumulando-se nas folhas. Excessos de Mn na solução do solo proporcionam reduções nas quantidades absorvidas de Ca e Mg pelas plantas.

A toxidez do Al e Mn são corrigidas pela aplicação de calcário ao solo, com elevação do pH, e seus excessos precipitados em formas de sais, diminuindo a absorção pela planta.

3.4.6 Fósforo disponível

Elemento absorvido em pequenas quantidades pelas raízes das plantas, na forma de ortofosfatos H_2PO_4^- e HPO_4^- , e fixado ao solo fortemente nas argilas, com pouca percolação, mobilidade e disponibilidade as plantas (SBCS, 2016; UENF, 2016), com exigência pequena em espécies florestais, em torno de 0,5 vezes a exigência de fósforo para cultura de grãos, cultura que necessita de grandes quantidades (SBCS, 2016). O íon ortofosfato esta mais disponível para as plantas em pH mais neutros, enquanto que em solos mais ácidos os íons são precipitados por espécies de Al^{3+} e Fe^{3+} , e em solos mais alcalinos estes íons ortofosfatos podem tornar-se compostos mais insolúveis pela reação com o carbonato de cálcio (UENF, 2016).

Embora o percentual de P nas plantas seja relativamente baixo, ele é um componente essencial, estimulando o crescimento e a formação do sistema radicular no início do desenvolvimento da planta, na formação da molécula de ATP utilizado no metabolismo energético (MALAVOLTA, 2006), participa do processo de respiração, influenciando no processo de fotossíntese, formação de compostos orgânicos e, transferência genética (EPSTEIN; BLOOM, 2006).

3.4.7 Cálcio e Magnésio

O elemento Ca presente na solução do solo é o principal nutriente do complexo de troca de cátions em solos sem excesso de acidez, absorvido pelas plantas como Ca^{2+} trocável, e retido em maiores quantidades em argilas e MO, devido as cargas negativas de suas superfícies, e menos em solos arenosos de pouca ou nenhuma carga. Em solos corrigidos ocupa 30% ou mais dos pontos da CTC, substituindo os elementos Al^{3+} e Mn^{2+} tóxicos as plantas.

Nas plantas o Ca constitui a parede celular das plantas, mantendo a integridade estrutural e funcional da membrana celular, evitando o vazamento citoplasmático e a permeabilidade a compostos hidrofílicos. Sua quantidade na planta depende consideravelmente da concentração de Ca e de H^+ no meio (MALAVOLTA, 2006), sendo um elemento pouco móvel dentro da planta. É um regulador enzimático, intervindo na atividade dos hormônios e enzimas que regulam o desenvolvimento das raízes e folhas, também é utilizado em grandes quantidades pelas bactéria fixadoras do nitrogênio, estimulando a atividade microbiana e aumentando a disponibilidade de absorção de outros nutrientes (MALAVOLTA, 1980; LOPES, 1998).

O elemento Mg é absorvido pelas plantas como cátion Mg^{2+} trocável, e juntamente com o Ca, são os principais nutrientes do complexo de troca de cátions em solos sem excesso de acidez, é encontrado na solução do solo e adsorvido nas superfícies dos coloides de argilas e MO de maneira mais fraca, sujeito a maior lixiviação que o Ca (MALAVOLTA, 2006), podendo ocorrer deficiências, mais frequentemente em solos arenosos, ácidos, e de elevados índices pluviométrico.

O Mg na forma solúvel no solo, é facilmente redistribuído nas plantas quando absorvido, funcionando como átomo central da molécula de clorofila nas folhas verdes, otimizando a absorção de luz e transferindo energia para os centros de reação da fotossíntese. Funciona como uma ponte entre moléculas de enzima e o ATP ou ADP, ligados a respiração e transferência de energia (MALAVOLTA, 2006).

A fonte mais comum de Ca e Mg é o calcário dolomítico $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$, material utilizado como corretivo de solo, neutralizando sua acidez (LOPES, 1998), fornecendo Ca e Mg, além de elementos-traços ao solo (SAMPAIO e ALMEIDA, 2009).

O calcário melhora a qualidade química do solo, elevando o valor do pH e corrigindo sua acidez através da neutralização de parte do H^+ adsorvido, elevando a V% no complexo de troca e o valor da CTC, neutralizando o Al e Mn trocável, tornando-os insolúveis, e diminuindo a m% a valores não tóxicos as plantas, aumentando a disponibilidade dos elementos nutrientes (SBCS, 2016; RONQUIM, 2020).

3.4.8 Potássio disponível

O elemento potássio (K) se encontra mais fixos nos coloides de argila e MO, e mais livres e com alta mobilidade em solos arenosos, absorvido pelas raízes da planta na forma de K^+ trocável.

O mecanismo de absorção celular de K é muito específico e seletivo, o que mantém sua concentração constante no solo, através de sua substituição na solução do solo exclusivamente por outro íon K, com reduzida perdas por lixiviação, podendo atingir teores bastante elevados (LOPES, 1998; RAIJ, 1991), mesmo em solos com altas concentrações de Ca e Mg (MALAVOLTA, 2006). Apresenta baixa exigência para espécies florestais, cerca de 0,7 vezes ao da cultura de grãos (SBCS, 2016).

O elemento K desempenha na planta funções estritamente regulatórias nos processos fisiológicos e osmóticos, manutenção do equilíbrio iônico, abertura e fechamento de estômatos, no controle das relações hídricas, transporte de açúcares, amido e síntese de ATP (KERBAUY 2004; MALAVOLTA 2006).

3.4.9 Micronutrientes (Mn, Zn e Cu)

Micronutrientes relacionados com a fase reprodutiva e crescimento das plantas, absorvidos nas suas formas iônicas nas frações solúveis em água e facilmente trocáveis, mas deficientes em solos arenosos e pobres em MO, devido a lixiviação. Apesar de suas baixas concentrações dentro dos tecidos e dos órgãos das plantas, os micronutrientes têm a mesma importância dos macronutrientes.

O elemento Mn é móvel no solo, e imóvel no tecido da planta, atuando como ativador de enzimas do crescimento das raízes secundárias, e nas reações de síntese da clorofila, e ação direta na fotossíntese, ajudando na produção de carboidratos e acelerando a germinação e a maturidade de frutos (LOPES, 1998).

O micronutriente Cu, participa na formação da clorofila, associado a enzimas envolvidas em transferências de elétrons na fotossíntese (MALAVOLTA, 2006) através de reações de oxirreduções (na forma iônica de Cu^{2+} e Cu^+).

O micronutriente Zn é adsorvido aos coloides de argila dos solos, favorecendo resistência à lixiviação e sua permanência na parte superior do solo, contribui no desenvolvimento das partes florais, produção de grãos e sementes e maturação precoce das plantas (TAIZ; ZEIGER, 2004).

3.4.10 Caracterização química dos solos

A caracterização química do solo ocorre através de análises que quantificam os elementos nutrientes na forma disponível, em condições de serem absorvidas pelas plantas via sistema radicular (RAIJ, 1981).

Os procedimentos são realizados através da extração dos elementos no solo, por meio da homogeneização das amostras com soluções químicas extratoras, solubilizando as formas extraíveis dos nutrientes presentes no solo, deslocando-as para o sobrenadante da solução por substituição e/ou deslocamento de cátions e ânions. A extração simula as condições e a capacidade das raízes das plantas em absorver os nutrientes do solo, durante seu desenvolvimento (COSTA, 2005), sendo os mais utilizados o Mehlich-1 e KCl 1 mol/L, por apresentarem melhores correlação entre nutriente extraído do solo e o nutriente absorvido pelas plantas (TEDESCO et al., 1995).

3.5 QUALIDADE DO SOLO E OS INDICADORES QUÍMICOS E FÍSICOS

O solo é proveniente do processo de intemperismo da rocha de origem, pela ação de agentes físicos na desagregação, e químicos na decomposição de suas estruturas originais (DAMASCENO, 2017), originando sedimentos acumulados na superfície da terra como cascalhos e areias, que através de processos químicos formam partículas em avançado grau de alteração, como argilas, que associados à matéria orgânica e organismos biológicos, solubilizam os nutrientes presentes no solo, tornando-os disponíveis as plantas (MOLINA, 2017) na condição de serem assimiladas em quantidades suficientes e balanceadas, livre de elementos tóxicos, tornam-se férteis, e atendendo as demandas do desenvolvimento vegetal (LOPES e GUILHERME, 2007; RONQUIM, 2020).

Solos em locais pós-mineração possuem a recuperação pedogênica lenta, devido a degradação física e alterações nos atributos químicos, o que acaba aumentando o tempo necessário à recuperação desses ambientes.

Avaliações de alterações nas propriedades do solo, decorrentes de alterações em ecossistemas naturais, podem constituir um importante instrumento para auxiliar no monitoramento da conservação ambiental, pois permitem caracterizar a situação atual, alertando para situações de risco, e prevendo situações futuras (CARDOSO, 2011), através de indicadores que medem a qualidade do solo em seu estado natural, e após alguma alteração (MELO FILHO, 2004).

A qualidade do solo está associada na capacidade de funcionamento de um ecossistema sustentável, avaliada através de indicadores físicos, químicos e biológicos, utilizados conjuntamente (FREITAS, 2012; ROUSSEAU, 2012), avaliando mudanças nas propriedades relacionados a degradação, em resposta a práticas de manejo do solo, mantendo ou não sua condição fértil (VEZZANI e MIELNICZUK, 2009).

A espessura do horizonte mais superficial do solo, tem sido utilizada nos indicadores da qualidade do solo, pois nesta profundidade encontra-se maior atividade da biota, sendo assim, o local propício para ciclagem de matéria orgânica e nutrientes (ARAÚJO, 2012), realizando a máxima produção de culturas ou funções ambientais (FERNANDES, 2019), através da utilização de espécies florestais de reflorestamento, como as utilizadas nas áreas em estudos de plantio de eucalipto, e área de pilha de resíduos.

3.5.1 Espécies florestais

O uso de espécies nativas diversas contribui para o sucesso da revegetação, uma vez que possuem mecanismos de tolerância aos estresses bióticos e abióticos dessa região, mas informações sobre exigências nutricionais de espécies florestais nativas são escassas na literatura (SORREANO et al., 2008), e os poucos estudos existentes são mais restritos a algumas formações vegetais, incluindo o eucalipto, utilizada em áreas de florestamento, que segue a interpretação da disponibilidade dos nutrientes recomendadas por SBCS (2016).

Estudos recentes de espécies vegetais com potencial para serem usadas na recuperação de áreas degradadas, mostraram a existência de espécies tolerantes a valores de pH na faixa de 4,2 a 5,0 e elementos tóxicos disponíveis nessa faixa.

O eucalipto é uma espécie perene, com sistema radicular profundo, e presença de raízes laterais e superficiais para absorção dos nutrientes até 20 cm de profundidade, tolerantes à acidez e Al^{3+} trocável, e menores respostas à correção da acidez do solo que culturas anuais.

Na interpretação dos valores, mesmo sem um pH de referência, é indicado a sua elevação a pH 5,5 e V% a 65%, através da adição de calcário dolomítico para a reposição de Ca e Mg a valores de 4 e 1 $cmol_c/dm^3$, respectivamente, considerados adequados para o bom desenvolvimento do eucalipto e outras espécies florestais (SBCS, 2016).

Após o desenvolvimento do sistema radicular, ocorre maior exploração do solo, fechamento da copa das árvores e queda de folhas e pequenos galhos, os quais potencializam uma maior ciclagem dos nutrientes da base florestal e maior eficiência de aproveitamento do

Ca, Mg, K, P e M.O do solo, sendo seus níveis nutricionais críticos menores que outras culturas de espécies florestais.

Os cultivos com espécies florestais são uma alternativa para programas de recuperação em áreas degradadas, com alta declividade, e aproveitamento industrial para descarte de resíduos com potencial poluente, como minérios em áreas florestadas (SBCS, 2004), e segundo a Emater (2013) o município de Caçapava do Sul possui 15.000 hectares plantadas de eucalipto e 500 hectares cultivadas com acácia-negra, desenvolvida em glebas reduzidas no interior de fazendas da região, demonstrando a expansão desta atividade nos últimos anos, e indicando tendência futura de atividade agrícola nas formações campestres locais.

As plantas arbóreas medicinais de maior porte, denominadas de plantas bioativas, são caracterizadas por apresentarem princípios ativos utilizados como medicamentos, cosméticos, nutricionais e industriais (CASTRO, 2005), são nativas de regiões tropicais e subtropicais, e adaptadas a áreas de elevada declividade, e de manejo importante no controle da erosão apresentando certa tolerância a solos ácidos e pobres.

A Aroeira Pimenteira é uma espécie de árvore nativa, possui altura entre 5 e 10 m, com tronco de 30-60 cm de diâmetro revestido com casca grossa, é uma planta pioneira, comum em beira de rios, córregos e várzeas, entretanto também cresce em terrenos secos e pobres, são muito indicadas para ações de reflorestamento e preservação ambiental em áreas que já foram degradadas (IBFLORESTAS, 2020).

A Aroeira periquita é árvore de folhas perenes, comumente entre 3 a 12 m de altura, de crescimento inicial em altura muito rápido, boa capacidade de regeneração natural e resistentes a temperaturas muito baixas. É considerada uma das espécies precursoras e pioneira mais agressivas em solos pedregosos e drenados, é recomendada na recuperação ambiental de ecossistemas degradados e reflorestamento (EMBRAPA, 2003). O sistema radicial é caracterizado por uma raiz principal maior, mas em solos rasos, esse sistema é superficial, onde as raízes laterais são bem desenvolvidas e as folhas constituem uma boa matéria orgânica, aumentando a fertilidade do solo (MOLLE, 1990).

O Ingazeiro se caracteriza por ser uma espécie de grande porte que na floresta crescem de 6 a 18 metros de altura, tronco curto e de 20 a 30 cm de diâmetro, e copa ampla e de crescimento rápido, planta pioneira, adapta-se a solos úmidos, e áreas ciliares degradadas próximo a rios e solos arenosos, crescendo também em terrenos enxutos, e em matas de terras firmes repletas de árvores gigantescas e emaranhadas de cipós e de raízes aparentes. Possui importância por ser fixadora de nitrogênio e recuperadora de áreas degradadas (SÃO FRANCISCO, 2023)

4. METODOLOGIA

Neste capítulo será descrito, discutido e debatido a metodologia utilizada na execução do trabalho.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1.1 Caracterização do município de Caçapava do Sul - RS

O município de Caçapava do Sul está localizado a 53°29'16'' W e 30°31'11'' S, situando-se a distância de 260 km do município de Porto Alegre, com vias de acesso pelas BR 290, BR 153, BR 392, RS 625 e RS 357, possuindo uma unidade territorial de 3.047,120 km², sua população é de 33.690 habitantes, com uma densidade demográfica populacional de 11,05 habitantes/km², e Índice de desenvolvimento humano (IDH) de 0,704 (IBGE, 2010).

Segundo o governo municipal de Caçapava do Sul, a economia do município é baseada principalmente pelo setor extrativista mineral, com relevância para as jazidas de rocha sedimentar calcária, e conforme a secretária municipal da fazenda, essa atividade corresponde a 35,7% de toda a economia de Caçapava do Sul de forma direta, seguido pela atividade agropecuária com 19,2%.

O município de Caçapava do Sul possui sete indústrias de calcário, que juntas são responsáveis pela produção de 85% de calcário dolomítico do Estado do Rio Grande do Sul, destacando-se a DB - Dagoberto Barcellos S/A como maior empresa do município na extração e beneficiamento de rocha calcária dolomítica, para a produção da cal, argamassa e corretivo do solo, sendo responsável por cerca de 70% do mercado da cal, 25% do calcário no estado do Rio Grande do Sul (SANTOS et. al., 2015) e por 2,1% de participação no total do valor comercializado pelo mercado nacional (SANTOS, 2009).

4.1.2 Caracterização da empresa Dagoberto Barcellos

A empresa Dagoberto Barcellos S/A localiza-se no interior do município de Caçapava do Sul, na localidade de Caieiras, as margens da BR 392 (Figura 1), junto ao parque industrial que abriga três fábricas com capacidade para a produção de mais de 1 milhão t/ano de calcário, uma moderna fábrica de cal para a indústria e construção civil, com capacidade de produção

anual de 160 mil t/ano, uma fábrica de argamassas com capacidade de produção anual de 120 mil t/ano e uma fábrica de fertilizantes de última geração.

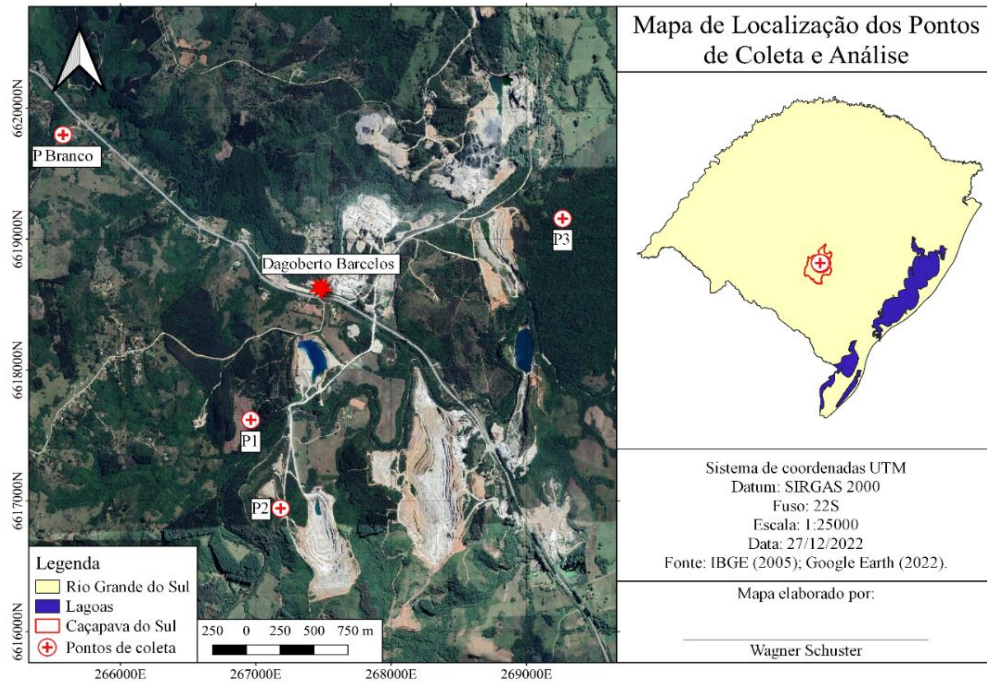
Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, no ano de 2009, a empresa Dagoberto Barcellos S/A foi classificada pela sua produção bruta *run-of-mine* (ROM) em toneladas anuais, como uma mineradora de grande porte na exploração do calcário, com produção bruta anual maior que um milhão de toneladas, estando entre as maiores produtoras do mercado brasileiro (SILVA, 2009).

Na empresa é realizada a extração de calcário metamorfozado (do tipo marga) ou mármore, que segundo Bortolotto (1987), se caracteriza por ser uma rocha metamórfica, possuindo entre 50% e 95% de carbonatos formados a partir de calcários e dolomitos, submetidos a pressões e temperaturas elevadas, podendo conter impurezas, normalmente de sílica.

De acordo com a sua composição química, diferentes destinações são dadas aos tipos de calcário, sendo a forma calcítica $[\text{CaCO}_3]$ destinados ao processo de calcinação e emprego na fabricação de cal e argamassa, enquanto o calcário dolomítico $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$, em função das características químicas, é empregado como corretivo de solo para a agricultura após moagem e peneiramento (FLORES, 2017), fornecendo nutrientes importantes para o solo como o cálcio (Ca) e magnésio (Mg), além de elementos-traços (SAMPAIO & ALMEIDA, 2008).

O calcário produzido pela empresa possui um Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) mínimo de 73% para o calcário agrícola dolomítico e de 90% para o calcário agrícola dolomítico especial, acima dos 45% determinado pelo Ministério da Agricultura, se caracterizando como um calcário de boa eficiência para a correção de solos.

Figura 1 – Localização da empresa mineradora Dagoberto Barcellos.



Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Características do clima, vegetação e solos das áreas

A região possui um microclima denominado de mesotérmico subtropical úmido que é caracterizado por ser frio e úmido no inverno, e quente e seco no verão. A temperatura média anual é de 18 °C, alcançando temperaturas acima de 35 °C no verão, e abaixo de 0 °C no inverno. A precipitação média anual é de 1.400 a 1.600 mm, com chuvas concentradas no período de inverno, este tipo de clima interfere no processo de desenvolvimento do solo, decompondo as rochas em áreas declivosas, alta taxa de erosão, e menor infiltração das chuvas, com elevada remoção de solo, contribuindo para a formação de solos rasos (CERETTA, 2010).

A área de estudo, de influência direta e indireta que corresponde ao processo de mineração, encontra-se com paisagem natural ambientalmente alterada, mas com uma parcela do território composta por uma vegetação nativa campestre e florestal.

A vegetação característica dessas áreas são variadas e conforme descritas por Sema (2014), com áreas nativas e florestas em maior distribuição nos fundos de vale, resultando em condições microclimáticas favoráveis para o desenvolvimento das árvores, que alcançam portes mais elevados, e presença de campos mistos, com formação predominante de vegetação infestados por barba-de-bode (*Aristida Vallens*) e vegetação alta e arbustiva, representada

principalmente por capões isolados de mirtáceas, (IBGE, 2012; BAPTISTA, 2015). Os afloramentos rochosos das áreas são cobertos por vegetação rupestre de plantas características da região, endêmicas e pertencentes principalmente as famílias Bromeliaceae e Cactaceae (VOTORANTIM, 2016; MELLO, 2019).

Os solos encontrados na empresa possuem características físicas próximas a descritas por Brasil (1973), pertencentes a Unidade Fisiográfica do Escudo Sul-rio-grandense, típicos da região, com a camada superficial pouco desenvolvida, composição arenosa, composta por rochas fragmentadas, presença de matacões, rochosidades, solos de coloração acinzentado a escuro em áreas mais preservadas, devido a maiores quantidades de serrapilheira, elevando os valores de MO.

O perfil do solo no decapeamento em algumas áreas se caracteriza por ser pouco desenvolvido, com aproximadamente 20 cm, com uma cobertura vegetal de gramíneas e arbustos, seguido de uma camada de material pouco argiloso de cor amarelo avermelhada, com fragmentos de rochas e seguido do xisto como capa, removido mecanicamente e utilizado posteriormente na recuperação de áreas degradadas.

Segundo Dagoberto Barcellos (2009), há geração de aproximadamente 100.000 toneladas de produtos finais por mês, e uma grande movimentação de ROM e material estéril (Quadro 1), depositado em pilhas (Figura 2). O beneficiamento do minério é realizado no complexo industrial da empresa, onde estão as áreas de lavra, pilhas de descarte de resíduos, e áreas de proteção permanente.

Quadro 1 – Quantidade de recursos extraídos e depositados em pilhas de resíduos.

Lavra	Indicadores	Quantidades/ano
Decapagem	Volume retirado	4.500 m ³
Extração de recursos	Quantidade extraída/ano	1.100.000 t
Geração de estéril	Quantidade/ano em pilhas	800.000 t
Pilha de resíduos	Nível dos estoques/mês	30.000 t

Fonte: Autoria própria, adaptado de Baptista (2015).

Figura 2 – Disposição de estéril e rejeitos.



Fonte: Acervo próprio.

4.2 AMOSTRAGEM, ENSAIOS E DETERMINAÇÃO DOS RESULTADOS DAS AMOSTRAS DE SOLO

A metodologia utilizada e descrita a seguir, na quantificação dos parâmetros químicos e físicos, foram desenvolvidos e padronizados para solos com critérios agrônômicos, e não para solos com grande concentração de rejeitos e estéreis da mineração, mas devido à inexistência de métodos específicos para caracterizar a fertilidade em solos com influência da mineração, os resultados apresentados podem servir como referencial na análise de sua qualidade. O estudo foi desenvolvido dentro da área do complexo industrial na empresa Dagoberto Barcellos (Figura 1), que possui áreas destinadas a exploração do minério, locais de depósitos dos estéreis da mina, lagoas de contenção, áreas de proteção permanentes, estradas e acessos, e demais infraestruturas necessárias ao seu funcionamento.

Foram selecionados quatro pontos distintos, buscando áreas com os diferentes usos em mata nativa, pilha de resíduos, área de plantio de eucalipto (Figura 1):

- O ponto P1 (UTM E 266963; UTM S 6617617) representa uma área adjacente as cavas de mineração, onde se encontra com plantio de eucalipto, com aproximadamente 50 hectares;
- O ponto P2 (UTM E 267184; UTM S 6616941) representa área adjacente as cavas de mineração, que recebeu os estéreis da mineração na recomposição da topografia local, chamada

de pilha de resíduos, com área de 15 hectares e plantio de espécies para reflorestamento como o ingazeiro, aroeira pimenteira, aroeira periquita, e espécies gramíneas de Capim Sudão e Azevém para a estabilidade de taludes.

- O ponto P3 (UTM E 269267; UTM S 6619155) representa uma área de referência, com fragmento florestal nativa de 200 hectares, de floresta sem nenhum manejo, mas próximos as áreas das cavas de mineração, e do beneficiamento do calcário.

- O ponto PB (UTM E 265576; UTM S 6619796) representa o solo sem influência do processo de mineração, chamado de Ponto Branco, no município de Caçapava do Sul.

A amostragem do solo foi realizada conforme o Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (SBCS, 2016), e descrito para cultura de espécies florestais perenes, buscando pontos de coleta de amostras representativas que descrevam a condição média da fertilidade do solo, em áreas com características homogêneas, sem grande diferenciação, como o tipo de solo, topografia, vegetação, cor, textura, drenagem, profundidade do perfil e o histórico de utilização e manejo.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Química e Fertilidade dos Solos do Instituto Federal Farroupilha – IFFar campus São Vicente do Sul.

4.3 DETERMINAÇÃO DOS INDICADORES FÍSICOS DO SOLO

4.3.1 Determinação granulométrica textural e densidade aparente do solo (Ds)

Para a análise granulométrica foram coletadas 03 amostras em cada área, na profundidade de 0-20 cm, com a utilização de pá de corte.

Sendo a granulometria de um solo representado pelas dimensões de suas partículas e suas respectivas porcentagens em massa (NBR, 1995), o objetivo de sua determinação é separar as frações constituintes do solo em TSFA - terra seca fina ao ar, nas frações areia, silte e argila pelo método da pipeta.

As amostras foram secas em estufa a 40 °C, moídas e passadas em peneiras de 2 mm, seguido por nova secagem a 105 °C, pesadas e agitadas com solução química dispersante de NaOH 6 % conforme (Figura 3a), para separação das partículas. Após a adição de água (Figura 3b), e posterior decantação, retira-se através de pipeta um volume em suspensão superficial (Figura 4a), para determinação da argila que é seca em estufa e pesada. A fração areia é separada por tamisação (Figura 4b), secas em estufa e pesadas para obtenção dos respectivos percentuais. O silte corresponde ao complemento dos percentuais para 100 %, e é obtido por diferença das

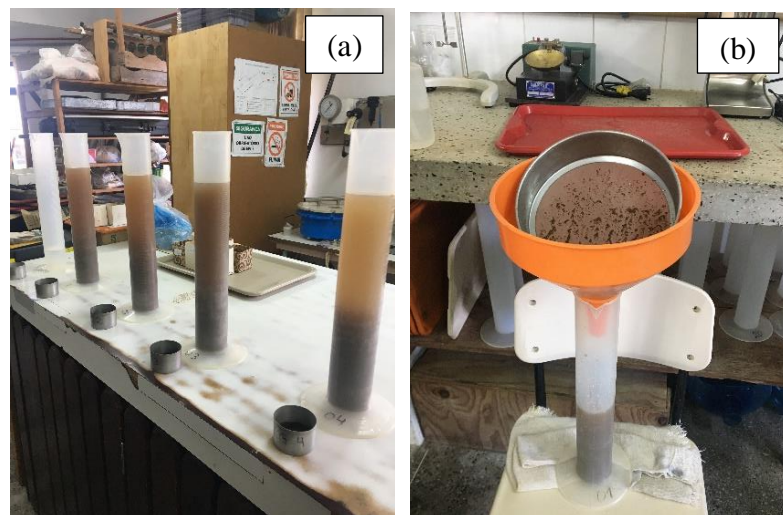
outras frações em relação à amostra original (EMBRAPA, 1979, 1997). A textura do solo é expressa em % das frações argila, silte e areia.

Figura 3 – (a) amostras após agitação com agente dispersante, e (b) amostras diluídas em água para decantação das frações do solo em TFSA.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 4 – (a) retirada da fração argila superficial por pipeta, e (b) lavagem e peneiramento para retirada da fração areia.



Fonte: Acervo próprio.

A D_s representa a relação entre a massa de solo seco e o volume total ocupado, ao natural, incluindo o espaço poroso, e foi determinada pelo método do anel volumétrico, com a coleta de 03 amostras indeformadas, utilizando-se um anel cilíndrico com volume conhecido

na camada que se deseja analisar, retirando o solo para posterior secagem da amostra em estufa a 105 °C.

Através da relação entre a massa do solo seco e o volume do cilindro, se obtém a densidade em g/cm³ (EMBRAPA, 1997), através da equação:

$$D_s \text{ (g/cm}^3\text{)} = P_s / V \quad (4)$$

Onde:

P_s = peso da amostra seca (g); e

V = volume do anel volumétrico (cm³).

4.3.2 Ensaio de permeabilidade e determinação da condutividade hidráulica

Para a estimativa do coeficiente de permeabilidade (k) do solo foi utilizado o equipamento de *Guelph* (Figura 5). Os ensaios foram executados *in situ* em cada ponto indicado nas áreas de estudo, buscando abranger possíveis diferenças sobre as características físicas do solo, e avaliar o comportamento do fluido sobre as áreas ocupadas na empresa mineradora.

O ensaio foi realizado em cinco etapas apresentadas por Santos (2005):

- Escolha do ponto na área;
- Perfuração com trado manual para a colocação do permeâmetro;
- Inserção de uma carga hidráulica constante de 5 cm até estabilizar; e
- Repetição do procedimento para uma carga hidráulica de 10 cm.

O cálculo da condutividade hidráulica foi realizada através da Equação 5 descrita por *Soil Corp* (1991) para a determinação do coeficiente de permeabilidade.

$$(k) = [(0,0041) (x) (R2) - (0,0054) (x) (R1)] \quad (5)$$

Onde:

k = condutividade hidráulica não saturada, em cm/s;

$R1$ e $R2$ = taxas de infiltração estabilizadas correspondentes a $H1$ (5 cm) e $H2$ (10 cm) respectivamente, e em cm/s;

x = constantes correspondentes à área do tubo (reservatório de água), em cm/s;

0,0041 e 0,0054 = valores adimensionais.

Figura 5 – Determinação da condutividade hidráulica do solo não saturado, com uso do permeâmetro de *Guelph*.



Fonte: Acervo próprio.

4.4 DETERMINAÇÃO DOS INDICADORES QUÍMICOS DO SOLO

4.4.1 Ensaio dos parâmetros químicos do solo

As etapas de preparação das amostras de solo incluindo a coleta, seguido pela extração dos nutrientes com soluções extratoras, análise quantitativa em equipamentos e emissão dos resultados, tiveram como base as metodologias de (TEDESCO,1995) e (SBCS, 2004; 2016).

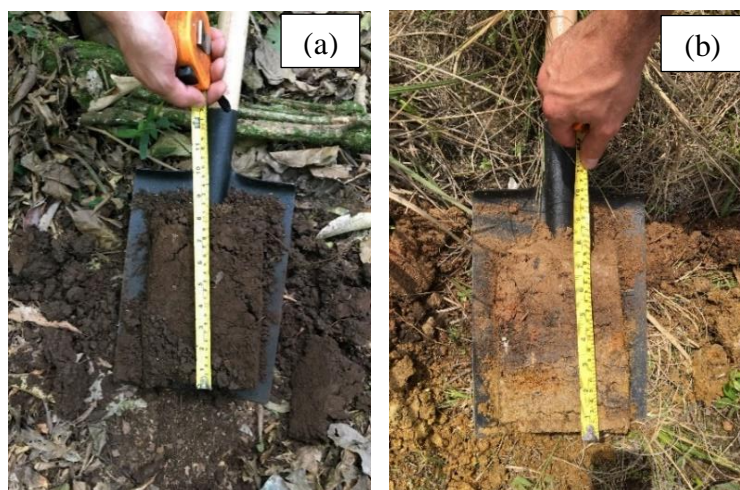
Foram coletadas dez (10) amostras simples em cada área, com intervalos de 15 m, de forma aleatória e alternadamente à direita e a esquerda em forma de “zig-zag”, nas profundidades de 0-20 cm para a análise química, em razão da maior concentração de raízes finas, próximo às plantas e dentro da projeção da copa, utilizando-se pá de corte (Figura 6a e Figura 6b) devido a compactação do solo, com remoção de restos vegetais e pedras da superfície do solo, e abertas pequenas trincheiras, onde foram coletadas as amostras.

Após a secagem em estufa na temperatura entre 40 a 45 °C, as amostras foram moídas em moinho com rotor de martelo e passadas em peneiras com 2 mm (10 Mesh) de abertura da malha, iniciando-se a etapa de análise laboratorial para obter valores de pH (H₂O), MO, P e K

disponíveis, teores de Ca, Mg e Al trocáveis, micronutrientes Mn, Zn e Cu, valores de CTC efetiva, CTC pH 7,0, V% e m%.

Os resultados são expressos em teor do elemento em peso por volume de solo, em $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, mg/dm^3 e % m/v.

Figura 6 – (a) coleta de amostra na área de mata nativa no ponto P3; e (b) coleta de amostra na área de pilha de estéreis e rejeitos no ponto P2.



Fonte: Acervo próprio.

4.4.2 Determinação do teor de matéria orgânica do solo (MO)

Foi determinado pelo método da combustão úmida, através da oxidação do carbono na MO do solo, por excesso de solução sulfocrômica ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4$), com aquecimento externo, em que o carbono orgânico (C) é oxidado e o cromo (Cr) é reduzido a Cr^{3+} ocorrendo modificação na intensidade da cor na solução sulfocrômica, proporcional ao teor de carbono do solo.

A determinação é realizada por técnica de colorimetria, utilizando a Espectrometria Molecular (EM) no Ultravioleta/Visível (UV/Vis) (UV-Visible Spectrophotometer T60), em comprimento de onda (λ) em 645 nm (Figura 7).

A oxidação dos compostos orgânicos do solo por dicromato de sódio com calor externo é o método mais simples e rápido de avaliar o carbono orgânico (TEDESCO, 1995; SBCS, 2016). Os valores são expressos em % m/v.

Figura 7 – Espectrofotômetro de UV/Vis.

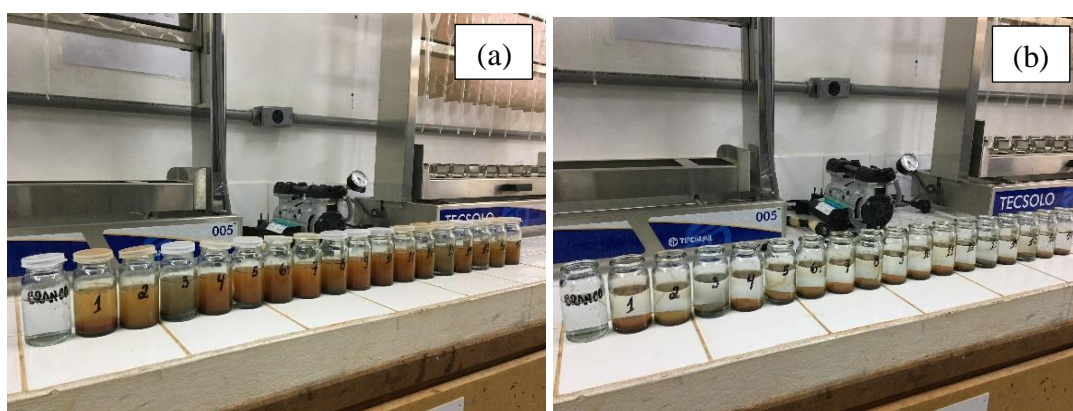


Fonte: Acervo próprio.

4.4.3 Determinação de Cálcio, Magnésio e Alumínio trocáveis

Utiliza-se o cloreto de potássio (KCl 1mol/L) que extrai os teores “trocáveis” de Ca, Mg e Al, uma vez que a soma das bases é na sua maior parte composta de Ca e Mg trocáveis (EMBRAPA, 1997). Após agitação (Figura 8a) e decantação (Figura 8b), retira-se a alíquota do sobrenadante para a leitura do Ca e Mg por espectrometria de absorção atômica (AAS) (equipamento GBC XplorAA Dual) (Figura 9).

Figura 8 – (a) Preparação das amostras após agitação com solução extratora, e (b) análise de macronutrientes e micronutrientes.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 9 – Equipamento Espectrofotômetro de Absorção Atômica.



Fonte; Acervo próprio.

Uma alíquota é retirada da mesma extração com KCl 1 mol/L, e a determinação do Al ocorre pela técnica de titulação volumétrica ácido-base (Figura 10), com solução diluída de NaOH (0,0125 mol/L) e indicador azul de bromotimol, pois os componentes ácidos do solo extraídos com KCl 1 mol/L são referidos como Al³⁺ trocável, e o resultado é conforme a equação 6.

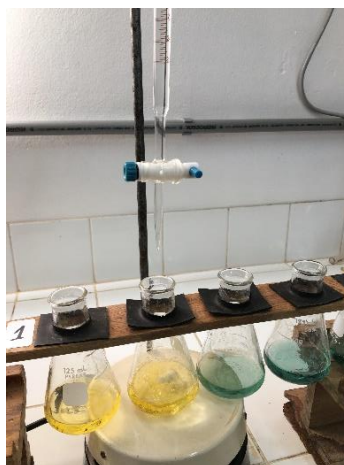
$$\text{Al}^{3+} = \text{mL NaOH} \quad (6)$$

Onde:

Al³⁺ = Al trocável em cmol_c/dm³; e

mL NaOH = volume gasto de NaOH em mL na titulação.

Figura 10 – Determinação do alumínio trocável por titulação ácido-base.



Fonte: Acervo próprio.

4.4.4 Determinação da acidez ativa do solo

A determinação do pH, consiste na medição eletroquímica da atividade de íons H^+ em suspensão solo-água na relação 1:1 no equipamento pHmetro, estimando a acidez ativa no solo (TEDESCO, 1995).

4.4.5 Determinação da disponibilidade de fósforo e potássio

Para a determinação do P e K disponíveis, utilizou-se o extrator ácido Mehlich-1 (H_2SO_4 0,025 mol/L + HCl 0,05 mol/L), que apresenta boa correlação em simular a absorção dos nutrientes pelas plantas, fornece extratos límpidos por sedimentação, condição essencial a colorimetria. Este extrator ácido cria um ambiente de baixo pH, solubilizando e deslocando parte dos cátions de fósforo adsorvido pelos constituintes do solo, retirando a maior quantidade de P ligado a Ca, e pequena quantidade do elemento que está ligado a Fe e Al, também deslocando a maior parte do K trocável preso ao solo, e presentes na solução do solo (TEDESCO, 1995).

Após agitação do solo com a solução extratora Mehlich-1 e posterior decantação, é retirado uma alíquota do sobrenadante para determinação do P e outra alíquota para K.

A determinação do P é realizada de forma indireta, empregando-se molibdato de amônio e uma solução redutora (ácido ascórbico) à alíquota contendo P, formando complexo de fósforo-molibdato, que é determinado por colorimetria, através da técnica de Espectrometria Molecular (EM) no Ultravioleta/Visível (UV/Vis) (equipamento UV-Visible Spectrophotometer T60), no comprimento de onda (λ) de 660 nm (Figura 7).

A determinação do K foi realizada com leitura direta da alíquota sobrenadante pela técnica de fotometria de chama (equipamento Micronal B462) (Figura 11). Os teores de fósforo e potássio são expressos em mg/dm^3 .

Na determinação do P é necessária estabelecer a classe textura do solo para a interpretação do teor de P do solo extraído pelo método Mehlich-1 que é baixa em solos com alto teor de argila.

O teor de argila é determinado pelo método do densímetro, após a agitação e dispersão do solo com solução de NaOH 0,167 mol/L, decantação e leitura com densímetro. Os resultados são convertidos em teor de argila expressa em % (m/v).

Figura 11 – Fotômetro de chama.



Fonte: Acervo próprio.

4.4.6 Determinação dos teores de micronutrientes Zn, Cu e Mn

Os micronutrientes Zn e Cu são determinados utilizando-se solução extratora Mehlich-1, com agitação (Figura 8a), decantação (Figura 8b) e retirada de alíquota do sobrenadante para leitura em AAS (equipamento GBC XplorAA Dual) (Figura 9). Os valores são expressos em mg/dm^3 .

Para o micronutriente Mn foi utilizado solução extratora KCl 1mol/L, com agitação, decantação e retirada de alíquota sobrenadante. A leitura é realizada em AAS, e os valores são expressos em mg/dm^3 (TEDESCO, 1995; SBCS, 2016).

4.4.7 Disponibilidade de nutrientes

As principais fontes naturais de nutrientes das plantas superiores que se desenvolvem no solos são originados de minerais primários das rochas e dos resíduos orgânicos, sendo que a composição e estrutura da rocha, e os processos de intemperismo, são os principais condicionantes da quantidade e qualidade dos nutrientes minerais dos solo (CERRI, 1999).

Nas áreas de estudo não houve uso de adubos ou adição de qualquer outro tipo de corretivo ao solo, e modificações nas concentrações dos elementos em cada área, são resultados

da influência dos processos de extração e beneficiamento do calcário, e do manejo no solo, influenciando alterações químicas dos solos.

Na interpretação dos resultados, os dados obtidos com a mensuração dos atributos foram comparados com os valores de referência preestabelecidos para cada parâmetro, com base na literatura.

Conforme a SBCS (2016), os valores das faixas de teores em cada parâmetro (Tabela 1), indicam as respectivas classes de disponibilidade dos nutrientes no solo para a cultura de espécies florestais, dividida em “muito baixo”, “baixo”, “médio”, “alto” e “muito alto”.

O objetivo da análise é quantificar os valores de cada parâmetro do solo e corrigi-lo através de recomendações, na qual consiste em aplicar substâncias ao solo para aumentar o teor do nutriente, e que este alcance e permaneça na faixa “alto”, pois é onde as culturas atingem rendimentos maiores que 90% na sua produção em campo, e neste caso, representando a maior correlação entre o teor de nutriente em análise e o maior rendimento na produção da cultura de espécies florestais, testadas a campo.

O melhor valor do pH de referência é o que possui correspondência com o valor da V%, sendo: pH 5,5 = V 65%; pH 6,0 = V 75% e pH 6,5 = V 85%.

O teor de argila, é classificado na classe (4, 3, 2 ou 1), conforme os valores nas faixas de ≤ 20 , 21 – 40, 41-60 e > 60 , respectivamente.

Tabela 1 - Classe de disponibilidade dos nutrientes e a faixa de valores limites em cada parâmetro na cultura de espécies florestais.

Classe de disponibilidade	Amplitudes de valores (faixas de teores)									
	MO	Argila	CTC ₇	Ca	Mg	K	P	Zn	Cu	Mn
	%	%	----- cmol _c /dm ³ -----			----- mg/dm ³ -----				
Muito baixo	-	-	-	-	-	≤ 30	≤ 5,0	-	-	-
Baixo	≤ 2,5	≤ 20	≤ 7,5	< 2,0	< 5,0	31 – 60	5,1 – 10	< 0,2	< 0,2	< 2,5
Médio	2,6 – 5,0	21 – 40	7,6 – 15	2,0 – 4,0	0,5 – 1,0	61 – 90	10,1 – 15,0	0,2 – 0,5	0,2 – 0,4	2,5 – 5,0
Alto	> 5,0	41 – 60	15,1 – 30	> 4,0	> 1,0	91 – 180	15,1 – 30	> 0,5	> 0,4	> 5,0
Muito alto	-	> 60	> 30	-	-	> 180	> 30	-	-	-

Fonte: Autoria própria, adaptado de SBCS (2016).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será apresentado os resultados obtidos neste estudo, nas três áreas pertencentes a empresa e a área referente ao ponto branco.

5.2 PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO

5.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica demonstrou que os valores médios da argila nos solos (Tabela 2) se enquadram na classe textural 4, com teor de argila $\leq 20\%$ conforme (SBCS, 2016), e textura Média – Franca em P1, P3 e PB, e Franco arenosa P2, conforme Santos (2018). Os solos apresentaram fragmentos de minerais primários e de rochas, o que eleva os teores da fração areia, variando de 37 a 68%, e conforme Brasil (1973) característico para textura dos solos na região do município de Caçapava do Sul.

Tabela 2 – Parâmetros físicos da fração percentual granulométrica, densidade aparente do solo e permeabilidade do solo não saturado, nas áreas de estudo.

Pontos	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Ds (g/cm ³)	k (cm/s)
P1	16,00	33,00	51,00	1,34	2,4 x 10 ⁻²
P2	10,00	22,00	68,00	1,60	4,4 x 10 ⁻²
P3	19,00	44,00	37,00	1,24	4,0 x 10 ⁻¹
PB	15,00	30,00	55,00	1,40	9,5 x 10 ⁻¹

Fonte: Autoria própria. Legenda – P1: Ponto 1 - Área de eucalipto; P2: Ponto 2 - Área de pilha de rejeitos; P3: Ponto 3 - Área nativa; PB: Ponto Branco; Ds: Densidade aparente do solo; k: Permeabilidade do solo.

Foi observado que no ponto P2 (pilha de resíduos), os teores de areia são mais elevados, devido aos estéreis e rejeitos da lavra depositados nesta área, oriundos da fragmentação das rochas durante a extração e beneficiamento do calcário, e também devido a mistura de solos de diversos perfis que complementam a formação da camada superficial do solo construído desta área.

Os pontos P1 (área de eucalipto) e PB (ponto branco) possuem as porcentagens equivalentes das partículas de argila, silte e areia, enquanto que P3 (área nativa) possui uma

distribuição mais homogênea das partículas, devido a maior presença de matéria orgânica no solo, que segundo Prado e Centurion (2001), e Carvalho Júnior (1998) possui um efeito cimentante, influenciando na agregação e floculação das partículas do solo em áreas com vegetação nativa.

A partícula de argila por ser uma partícula altamente carregada, está diretamente ligada a CTC dos solos, adsorção de nutrientes e a disponibilidade de água (LOPES, 1998), e seus teores foram considerados baixos (SBCS, 2016), mas se enquadrando dentro das características dos solos encontrados na região.

5.2.2 Densidade

Quanto à densidade aparente do solo (D_s), o valor foi superior na área de pilha de resíduos, em relação a área nativa e de plantio de eucalipto.

A D_s média foi maior em P2 ($1,60 \text{ g/cm}^3$) e menor em P3 ($1,24 \text{ g/cm}^3$) (tabela 2), valores estes dentro dos limites propostos por Reichert (2003) para a D_s crítica de algumas classes texturais, incluindo solos argilosos de $1,30$ a $1,40 \text{ g/cm}^3$, solos franco argilosos de $1,40$ a $1,50 \text{ g/cm}^3$ e solos franco arenosos de $1,70$ a $1,80 \text{ g/cm}^3$.

O valor mais elevado em P2 reflete a existência de compactação do solo superficial nessas áreas, considerando que a D_s é a medida quantitativa mais direta da compactação (MACHADO, 2003), e segundo Sherestha (2011) isto ocorre em áreas mineradas, devido a compactação provocada pela sobrecarga de materiais nas pilhas de estéril e trânsito de maquinários na reconstrução do solo superficial, promovendo seu adensamento, com as partículas menores preenchendo os espaços entre as partículas maiores, alterando o volume do solo, situação que foi está observada nesta área, e que ocorre na construção da pilha de resíduos pela empresa.

Houve um aumento na D_s em 29% de P3 para P2, situação que impede o maior aproveitamento de nutrientes e água pelas raízes devido a menor permeabilidade (Tabela 2), ao mesmo tempo em que a oxigenação do solo torna-se mais deficiente, e há dificuldade no desenvolvimento das plantas pelo aumento da resistência ao crescimento das raízes.

Em P1 e P3, a D_s foi menor, devido ao maior teor de MO, que interfere indiretamente sobre a D_s , através da melhor distribuição e estruturação das partículas granulométricas na cobertura vegetal do solo (FERREIRA, 2010), e também devido a maior quantidade de plantas de maior porte na área, que através de seus sistemas radiculares descompactam as camadas superficiais do solo, tornando-as menos densas e permeáveis (ZENG, 2014).

No ponto PB, o valor da D_s foi de $1,40 \text{ g/cm}^3$, valor igual ao encontrado por Randolph (2016), que analisando a D_s em área de plantio e área nativa no município de Caçapava do Sul, encontrou valores de $1,80 \text{ g/cm}^3$ e $1,40 \text{ g/cm}^3$ respectivamente, demonstrando que solos das áreas P1 e P3 nas áreas de mineração, e PB, se encontram com grau de compactação próximos a solos da região.

Os valores encontrados nos solos para classificação textural, granulométrica e D_s , tanto na área de referência quanto em pilha de resíduos foram próximos aos encontrados por Nascimento (2015).

Em solos com maior D_s como em P2, pode ocorrer maior impedimento ao desenvolvimento ideal das espécies no local, sendo assim o plantio de espécies pioneiras de rápido crescimento e boa capacidade de regeneração natural, recomendadas na recuperação ambiental de ecossistemas degradados e reflorestamento em solos pedregosos e bem drenados (EMBRAPA, 2003).

Autores como Silva (2008) e Pequeno (2011), citam que Solos com alto grau de compactação e alta densidade são marcados pela resistência à penetração das raízes, por isso o estudo da densidade do solo mostra-se como um parâmetro importante.

5.2.3 Coeficiente de permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade do solo (k) na zona não saturada, realizado através do ensaio com permeâmetro de *Guelph*, demonstrou através da Tabela 2, que o solo em PB possui k de $9,5 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$, e foi o de maior permeabilidade do solo, seguido pelo ponto P3 com k de $4,0 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$. Foi observado um movimento de infiltração da água mais rápida nestes pontos, assim pode-se afirmar que a permeabilidade destes solos são maiores, devido a presença de maiores quantidades de raízes, solos aparentemente mais descompactados, e presença de materiais de maior permeabilidade resultantes de restos de vegetação em decomposição.

O valor de permeabilidade no ponto P1, com k de $2,4 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$, foi próximo ao encontrado por Fernandes (2023), em solo localizado no município de Caçapava do Sul, e k de $2,89 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$.

O ponto P2, apresentou o menor coeficiente de permeabilidade do solo entre as áreas, com k de $4,4 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$. Como demonstrado na Tabela 2, este ponto apresenta maior teor da fração areia e aumento na densidade do solo, redução da permeabilidade e da infiltração de água

no perfil do solo, e diminuição do teor de matéria orgânica (Tabela 3) comumente verificada nestes tipos de solos, conforme citados em (SILVA, 2011; PEZARICO, 2013).

Os autores Mello e Teixeira (1962), citam através de uma escala o coeficiente de permeabilidade do solo relacionado com o tipo de material encontrado, sendo classificado como pedregulho os locais com o coeficiente de permeabilidade ($>10^{-1}$ cm/s), as areias puras entre (10^{-1} e 10^{-3} cm/s), as areias finas siltsosas e argilosas e siltes argilosos entre (10^{-3} e 10^{-7} cm/s), e as argila com ($<10^{-7}$ cm/s).

As diferenças observadas nos atributos físicos dos solos entre as áreas estudadas, demonstram perda da qualidade do solo de P3 em relação ao P2, devido a este ser um solo construído, com a mistura de vários perfis de solos, deposição de estéreis e rejeitos, com posterior compactação.

5.3 PARÂMETROS QUÍMICOS DO SOLO

Os resultados químicos obtidos foram dispostos em tabelas, figura, e gráficos, de forma a facilitar a visualização dos dados químicos, e as variações nas medidas de cada parâmetro, sendo inicialmente submetidos a um tratamento de análise estatística descritiva de média, mediana e desvio padrão, representando as diferentes áreas e pontos de coleta.

Os valores apresentados em tabelas e em diagrama de Boxplot ou diagrama de caixas, para cada parâmetro nas áreas de estudo, demonstram sua distribuição ao longo da área, com valores de máximo e mínimo, e pontos de outliers, representados por pontos atípicos no diagrama.

Os parâmetros analisados também foram submetidas à análise de variância (ANOVA), rejeitando ou não a hipótese de igualdade de médias nos grupos, através de valores que representam a variação em torno desta média, e posteriormente realizado o teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p<0,05$) para comparação destas médias, indicando se há diferença entre as áreas.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3, os resultados obtidos nas áreas de estudo e representadas pelos ponto P1, P2, P3 e PB, foram comparados aos valores indicados por SBCS (2016), para a cultura de espécies florestais.

Tabela 3 – Valores dos parâmetros nos solos das áreas de estudo, e classe de disponibilidade dos elementos conforme a cultura de espécies florestais.

Parâmetros	Classe de disponibilidade dos elementos					Pontos			
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto	P1	P2	P3	PB
MO (%)	-	≤ 2,5	2,6 - 5,0	> 5,0	-	3,72	0,98	5,00	2,50
Argila (%)	-	≤ 20	21 - 40	41 - 60	> 60	17,00	18,00	17,00	17,00
CTC ₇ (cmol _c /dm ³)	-	≤ 7,5	7,6 - 15	15,1 - 30	> 30	16,3	16,82	29,50	9,26
Ca (cmol _c /dm ³)	-	< 2,0	2,0 - 4,0	> 4,0	-	9,24	8,15	21,21	4,00
Mg (cmol _c /dm ³)	-	< 5,0	0,5 - 1,0	> 1,0	-	4,58	7,27	5,65	2,00
K (mg/dm ³)	≤ 30	31 - 60	61 - 90	91 - 180	> 180	83,2	105	89,6	80,00
P (mg/dm ³)	≤ 5,0	5,1 - 10	10,1 - 15,0	15,1 - 30	> 30	4,12	4,2	218	18,00
Zn (mg/dm ³)	-	< 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5	-	3,02	0,5	5,7	4,00
Cu (mg/dm ³)	-	< 0,2	0,2 - 0,4	> 0,4	-	0,41	0,05	0,19	0,50
Mn (mg/dm ³)	-	< 2,5	2,5 - 5,0	> 5,0	-	21,00	8,80	14,00	12,00

Fonte: Autoria própria. Legenda – MO: Teor de matéria orgânica; CTC₇: Capacidade de troca catiônica; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; K: Potássio; P: Fósforo; Zn: Zinco; Cu: Cobre; Mn: Manganês.

Na tabela 4, os resultados dos parâmetros químicos das amostras das áreas, estão representadas pelos pontos P1, P2 e P3, e outro ponto denominado PB, próximo ao município de Caçapava do Sul, mas sem influência do processo de mineração, e utilizado como referência. Os valores estão representados na forma de estatística descritiva e expressos em medidas de tendência central (média e mediana), medidas de dispersão (desvio padrão e variância), e valores de mínimo e máximo.

Posteriormente os dados foram expostos na forma de Boxplot ou diagrama de caixa (Figura 12), auxiliando a visualização da posição, dispersão e valores discrepantes (outliers) do conjunto de dados, além da comparação gráfica entre as áreas. A mediana representada pela linha horizontal dentro da caixa (2º quartil), melhor representa o valor do parâmetro, não sendo tão fortemente influenciada por valores distorcidos, enquanto que a média representa a dispersão dos dados interquartil (tamanho da caixa), sendo mais influenciada pelos valores extremos de mínimo, máximo e outliers, alterando o desvio padrão e variância.

Tabela 4 – Resultados dos parâmetros avaliados nas áreas de estudo, no município de Caçapava do Sul, RS.

Pontos	pH	MO	CTC ₇	Ca	Mg	K	P	Zn	Cu	Mn
	(H ₂ O)	%	----- cmol _c /dm ³ -----				----- mg/dm ³ -----			
P1										
Média	6,84	3,72	16,34	9,24	4,58	83,20	4,12	3,02	0,41	21,85
Mediana	7,17	3,45	15,86	9,15	5,10	82,00	3,80	3,15	0,20	21,80
Dp	0,65	1,52	5,59	4,44	1,75	29,74	1,68	1,01	0,46	6,24
Variância	0,42	2,31	31,2	19,71	3,04	884	2,81	1,02	0,21	38,98
Mínimo	5,90	1,70	6,19	3,10	1,40	40,00	2,00	1,80	0,01	15,30
Máximo	7,50	7,20	27,93	18,80	7,30	130	7,00	4,60	1,10	35,70
P2										
Média	7,90	0,98	16,82	8,15	7,27	105	4,20	0,50	0,05	8,87
Mediana	8,00	0,90	17,41	8,30	9,00	109	4,20	0,50	0,01	8,15
Dp	0,24	0,32	4,15	2,41	3,01	38,39	1,26	0,38	0,10	3,23
Variância	0,05	0,10	17,1	5,80	9,07	1474	1,59	0,14	0,01	10,46
Mínimo	7,30	0,40	8,79	4,30	1,60	44,00	2,10	0,10	0,01	4,40
Máximo	8,00	1,50	23,70	12,70	9,90	148	6,40	1,00	0,30	13,60
P3										
Média	7,18	5,00	29,50	21,21	5,65	89,60	218	5,77	0,19	14,08
Mediana	7,20	5,10	30,04	21,40	5,55	88,00	218	5,65	0,10	14,00
Dp	0,15	0,76	4,99	4,07	0,75	24,81	2,31	1,88	0,14	3,14
Variância	0,02	0,57	24,9	16,56	0,56	615	5,34	3,53	0,02	10,04
Mínimo	6,90	3,70	22,88	16,10	4,30	56,00	214	2,30	0,10	8,10
Máximo	7,40	5,90	36,38	27,00	6,70	140	222	8,70	0,50	18,80
PB										
	6,50	2,50	9,26	4,00	2,00	80,00	18	4,00	0,50	12,00

Fonte: Autoria própria. Legenda – pH: Potencial hidrogeniônico; Dp: Desvio padrão.

Na caracterização da disponibilidade química de nutrientes (Tabelas 1 e 3), alguns parâmetros estão abaixo ou acima da faixa “alto”, sendo que nestas áreas de estudo não houve a utilização ou adição de qualquer tipo de corretivo, visando o tratamento ou melhoria do solo. As concentrações dos elementos no solo em cada área possuem influência devido aos processo de extração e beneficiamento do calcário, que adicionaram elementos químicos da rocha calcária, alterando o equilíbrio dinâmico da ciclagem natural dos nutrientes no solo. Segundo Folster e Khanna (1997), as entradas naturais de nutrientes no solo são originárias do intemperismo e da decomposição de resíduos orgânicos, sendo equivalentes às perdas pela lixiviação das bases, assimilação pelas plantas e mineralização da matéria orgânica.

Com a análise dos valores obtidos, observa-se que os alguns parâmetros apresentaram concentrações na faixa “alto”, indicando boa disponibilidade destes elementos no solo, enquanto outros estão abaixo desta faixa, em quantidades “médio”, “baixo” ou “muito baixo”, indicando que o solo necessita de alguma correção para se enquadrar na faixa “alto”, a mais adequada para o desenvolvimento de espécies florestais. Os parâmetros dos elementos Ca, Mg,

e Zn apresentaram concentrações dentro da faixa “alto” em P1, P2, P3 e PB, o parâmetro CTC₇ foi “alto” em P1, P2 e P3, o elemento fósforo (P) em PB, o potássio (K) em P2, e o parâmetro de MO foi “alto” em P3. O elemento fósforo em P3 foi o único parâmetro que se enquadrou na faixa “muito alto” de disponibilidade de nutrientes.

Na caracterização química, os solos analisados apresentam de maneira geral, elevados valores de pH, com solos moderadamente alcalinos, elevados valores de bases de Ca e Mg, nutrientes essenciais que elevaram os valores da CTC, com V% > 50%, e m% nulo, sem presença de Al³⁺ fitotóxico as planta, pouca presença de cátions de H⁺ e consequentemente baixa acidez ativa e potencial, características de solos férteis (Eutróficos), e quantidades adequadas de micronutrientes.

Estas características químicas encontradas diferem da grande maioria dos solos naturais do Brasil citados por Lopes (1998) e Gonçalves (2000), e solos da região de Caçapava do Sul citados por Brasil (1973), de baixos valores de pH e elevada acidez, baixa concentração dos nutrientes Ca, Mg e K, baixa V%, CTC e micronutrientes Zn e Cu, alta capacidade de fixação do P ao solo, e elevada m% devido à alta presença do cátion Al³⁺ fitotóxico.

Estas diferenças entre as características dos solos da região e de áreas de mineração próximas se deve as operações de lavra, que tendem a misturar diversos materiais ao acaso, de várias profundidades da coluna geológica, razão pela qual as propriedades destes solos variam em maiores proporções do que um solo natural.

Tabela 5 – Média dos parâmetros avaliados em cada solo.

Pontos	pH (H ₂ O)	MO %	CTC ₇ -- cmol _c /dm ³ --	Ca	K	P	Zn	Mn
						----- mg/dm ³ -----		
P1	6,84b	3,72a	16,34b	9,24b	83,20a	4,12b	3,02b	21,85a
P2	7,90a	0,98b	16,82b	8,15b	105,00a	4,20b	0,50c	8,87c
P3	7,18b	5,00a	29,50a	21,21a	89,60a	218,00a	5,77a	14,08b

Fonte: Autoria própria. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

5.3.1 Análise de pH

Os valores médios de pH (Tabela 4) nos pontos P1, P2 e P3 ficaram entre 6,84 a 7,90, chegando a variar de 5,90 a 8,00 quando observada as medidas de mínimo e máximo nas amostras individuais. Segundo os critérios adotados pela Embrapa Solos em Santos (2018), que distingue o estado de acidez ou alcalinidade nos solos, classificando-os conforme o pH em Extremamente ácido (< 4,3), Fortemente ácido (4,30 – 5,3), Moderadamente ácido (5,4 – 6,5), Praticamente neutro (6,6 – 7,3), Moderadamente alcalino (7,4 – 8,3) e Fortemente alcalino (> 8,3). Os valores médios de pH dos solos estudados, podem ser comparativamente classificados em Praticamente neutro a Moderadamente alcalino, nas áreas de mineração, e Moderadamente ácido em PB. Estes valores são próximos aos citados por Lima (2016), em áreas ambientalmente alteradas pela extração de calcário.

Os valores médios de pH possuem diferença significativa entre as áreas ($p = 0,0112$), e suas variâncias consideradas não homogêneas. Não existe diferença estatística entre as médias P1 e P3, enquanto que P2 possui diferença com as médias de P1 e P3 (Tabela 5).

O pH em P1 possui maior Dp dos valores, indicando heterogeneidade dos valores ao longo da área (Tabela 4), e conforme a Figura 12, distribuição com assimetria negativa, indicando que mais da metade dos dados estão acima da média, sendo a mediana a medida que melhor representa seus valores.

O pH é mais elevado em P2, demonstrando uma distribuição equilibrada dos valores das amostras na área (Figura 12), com valores de média e mediana próximos, mesmo com presença de outliers.

O ponto P3 mostrou ser a área mais equilibrada na distribuição dos valores de pH no solo, com valores de média e mediana próximas, baixo desvio padrão e variância e sem pontos extremos.

Conforme citado em SBCS (2016), a cultura de espécies florestais não possui um pH de referência, sendo o mais indicado a utilização de valores que possuam correspondência com o valor da V%, com o pH 5,5 = V 65%, pH 6,0 = V 75% e pH 6,5 = V 85%, e segundo Ronquim (2020) a melhor relação fica entre pH 6,0 – 6,5 e V% entre 50 e 80%, e assim, fazendo a correspondência com os solos estudados, o ponto P1 e PB se aproximam dos valores da relação pH 6,5 e V 85%, indicando equilíbrio entre pH e as bases nutrientes do solo.

Foi observado a ausência de fragmentos do mineral calcário nos solos superficiais, e o elevado valor de pH nas áreas comparados a PB se deve a influência do processo de extração e

beneficiamento do calcário, que emite muitos particulados em suspensão no ar, depositando-se nos solos.

Diferentemente do que ocorre em solos tropicais e subtropicais em que os elementos cálcio, magnésio e potássio são baixos, e a acidez e o processo de acidificação dos solos são maiores (LUCHESE, 2002), nas áreas de estudo foram estes os principais elementos que elevaram o pH e diminuíram a acidez do solo. O calcário, além de elevar os valores de pH dos solos, e corrigir qualquer acidez tornando o Al fitotóxico indisponível, também supre o solo de cálcio e magnésio (BISSANI 2004), contribuindo no desenvolvimento da vegetação.

A acidez total (H+Al), composta pela acidez trocável e não trocável, apresentou diferenças entre as áreas ($p = 0,0194$), sendo baixa em P2 devido ao elevado pH da área e ausência de Al, enquanto que os solos em P1 existe uma acidez total potencial maior, devido aos valores mais baixos de pH (Figura 12).

O teor de alumínio trocável foi muito baixo nos solos, devido à grande quantidade de Ca e Mg, elevando os valores de pH, e precipitando o Al em formas insolúveis no solo (RAIJ, 2011), como o hidróxido de Alumínio, sendo utilizada na avaliação da toxidez por alumínio no solo, a saturação por Al (m%) como parâmetro de medida (RONQUIM, 2010).

5.3.2 Somas de bases (SB) e saturação por bases (V%)

A soma de bases trocáveis no solo, através das partículas de argila ou MO, representa a soma dos teores de cátions permutáveis ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$), exceto H^+ e Al^{3+} , indicando o número de cargas negativas existentes nos coloides, e permitindo o cálculo da V% na CTC.

Os teores de Ca foram elevados e na classe “alto” de disponibilidade dos nutrientes (Tabela 1 e 3) em P1, P2 P3 e PB, e suas médias consideradas não homogêneas ($p = 0,0246$), com diferença entre as áreas. As médias nos pontos P1 e P2 não possuem diferença entre si, enquanto P3 possui diferença significativa em relação as outras áreas (Tabela 5). A média é maior em P3 (Tabela 4), indicando maiores concentrações de Ca entre as áreas estudadas, devido a ciclagem de nutrientes que ocorre através do maior teor de MO, que retém mais Ca trocável na superfície do solo. Em P1 ocorre maior dispersão do elemento Ca, e seus valores de máximo e mínimo ao longo da área. O ponto P2 possui valores mais homogêneos, com média e mediana próximos, indicando que o Ca possui distribuição mais homogênea ao longo da área.

Os teores de Mg foram elevados e dentro da classe “alto” de disponibilidade de nutrientes em P1, P2, P3 e PB (Tabela 1 e 3), e as suas médias consideradas homogêneas ($p =$

0,2639). Em P2 ocorreu a presença de outliers, que aumentaram o valor de dispersão do elemento na área (Figura 12) e (Tabela 4).

O teor de potássio em P2 está na classe “alto” de disponibilidade de nutrientes, e “médio” em P1, P3 e PB (Tabela 1 e 3), e as médias consideradas homogêneas ($p = 0,4356$), não apresentaram diferença entre as áreas (Tabela 5). Em todos os pontos ocorreram elevados valores de dispersão ao longo das áreas, comum para o elemento potássio, que possui grande capacidade de lixiviação. Em P2, ocorre maior dispersão do elemento ao longo da área, apresentando um diagrama de Boxplot simétrico, sendo a mediana, a medida de que melhor representa os valores da média do K na área P2, assim como em P1.

A saturação por bases (V%) expressa em porcentagem as bases trocáveis de Ca, Mg e K retidos no complexo de troca dos solos, sendo as suas concentrações em P1, P2, P3 e PB elevadas (Tabela 7), e sem diferença entre as médias das áreas ($p = 0,4651$). Na área P1 a distribuição é assimétrica negativa (Figura 12), indicando que a maior parte dos valores estão acima da média, sendo a mediana a melhor medida para o parâmetro, apresenta maior dispersão das bases ao longo da área, e dos valores de mínimo e máximo. Em P2 e P3, as médias e mediana são próximas, demonstrando pouca dispersão das bases de Ca e Mg ao longo das áreas.

O valor do elemento Ca contribui em maior concentração para a V% no complexo de troca dos solos em todas as áreas, sendo maior em P3, e menor em P2, enquanto que o cátion ácido H^+ é maior em PB, indicando um solo levemente mais ácido e de menor pH. Em P2 a presença do cátion H^+ foi menor, com pH mais elevado e menor acidez (Tabela 7) valores próximos aos encontrados por Lima (2016) em áreas de extração de calcário. As áreas P1 e PB, estão em condições mais próximas aos citados por SBCS (2016) para espécies florestais, e por Ronquim (2020), com $V = 85\%$ e pH aproximado de 6,5.

Os elevados valores de soma das bases e pH, e baixas concentrações de cátions de H^+ e Al^{3+} nas áreas de estudo, sugerem um solo com boa fertilidade e concentrações de nutrientes, sem elementos em nível fitotóxico para as plantas, de acordo com Ronquim (2020), Santos (2018), Duarte e Casagrande (2006).

Tabela 6 – Concentrações dos cátions nas CTC efetiva e CTC pH 7,0 dos solos nas áreas de estudo.

Pontos	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SB	Al ³⁺	CTC _{ef.}	H ⁺	CTC ₇
	----- cmol _c /dm ³ -----							
P1	9,24	4,58	0,22	14,04	0,00	14,04	2,30	16,34
P2	8,15	7,27	0,27	15,69	0,00	15,69	1,13	16,82
P3	21,21	5,65	0,23	27,09	0,00	27,09	2,41	29,50
PB	4,00	2,00	0,20	6,20	0,00	6,20	1,74	7,94

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Porcentagem de saturação por bases (V%) e saturação por cátions ácidos (M%) no complexo de troca de cátions dos solos.

Pontos	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	V	Al ³⁺	m	H ⁺	M	Total
	----- % -----								
P1	56,55	28,03	1,34	85,92	0,00	0,00	14,08	14,08	100
P2	48,45	43,22	1,60	93,28	0,00	0,00	6,72	6,72	100
P3	71,90	19,15	0,78	91,83	0,00	0,00	8,17	8,17	100
PB	50,37	25,18	2,51	78,07	0,00	0,00	21,92	21,92	100

Fonte: Autoria própria.

Legenda – Ca²⁺: Cátion cálcio; Mg²⁺: Cátion magnésio; K⁺: Cátion potássio; V: Saturação por bases; Al³⁺: Cátion alumínio; m: Saturação por alumínio; H⁺: Cátion hidrogênio; M: Saturação por cátions ácidos.

5.3.3 Valores de CTC

A CTC do solo expressa a medida da quantidade e capacidade de trocas de cátions básicos de Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺, além dos cátions ácidos de Al³⁺ e H⁺, retidos em determinadas condições, como pH, teores de argila e MO no solo. Houve um aumento da CTC efetiva e CTC₇ do solo nas áreas em relação ao ponto branco. Os valores de CTC₇ foram elevados e na classe “alto” de disponibilidade dos nutrientes em P1, P2 e P3, e “médio” no ponto PB (Tabela 3). As médias foram homogêneas e sem diferença significativa (p = 0,6860). A área P3 possui média diferente em relação as outras áreas (Tabela 5), enquanto que os pontos P1 e P2 não apresentam diferenças entre si.

A CTC₇ e a CTC efetiva foram elevadas em P3 (Tabela 1 e 3), com menor dispersão ao longo da área, enquanto que em P1 e P2 ocorre maior dispersão dos valores, devido a presença de outliers.

Os valores da CTC nos pontos P1, P2, P3 e PB, foram influenciados pela soma das bases de Ca e Mg (Tabela 6), confirmando que os sítios de troca dos coloides na CTC₇ e CTC efetiva estão ocupados, na sua maioria, por elevada porcentagem de cátions de Ca²⁺ e Mg²⁺ trocáveis (Tabelas 7), restando poucas cargas negativas para troca por cátions H⁺ e Al³⁺.

5.3.4 Teor de matéria orgânica (MO)

O teor de MO nos solos entre as áreas são diferentes, devido a biomassa vegetal existentes em cada área, resultando em diferenças na textura, densidade, condutividade hidráulica, retenção de água e CTC nos solos, interferindo na disponibilidade de nutrientes.

Os teores de MO conforme a Tabelas 1 e 3, foram elevados em P3, médios em P1, baixos em PB e muito baixos em P2, com médias não homogêneas ($p = 0,0370$). As áreas possuem assimetria positiva (Figura 12), indicando que mais da metade dos dados estão abaixo da média, sendo a mediana a medida que melhor representa os dados de MO.

As médias entre P1 e P3 não são diferentes (Tabela 5), enquanto que P2 possui diferença significativa em relação aos outros pontos. Os pontos P1 e P3 possuem maiores teores de MO, e grandes diferenças entre mínimo e máximo, com mais dispersão dos valores na extensão das áreas, enquanto que P2 possui menor valor de MO e distribuição mais homogênea na área.

Os teores de MO em P3 e P1 são mais elevados devido a maior presença de vegetação de grande porte, com acúmulo de serrapilheira ocasionado pela queda de galhos e folhas, sendo a principal fonte de MO em decomposição do solo, e contribuindo para que os elementos químicos contidos nestes materiais, sejam liberados na camada superficial. A área de mata nativa se apresenta conservada, e segundo Barreto (2006) a fertilidade do solo neste tipo de área, apresenta uma manutenção constante pela deposição de material orgânico, que é decomposto rapidamente em solos mais arenosos, disponibilizando os nutrientes em tempo mais curto as plantas.

Na área P2 ocorreu redução significativa no teor de MO, devido a deposição de estéreis e rejeitos, e mistura de vários tipos de solos, com inversão natural de seus perfis (Figura 5), onde os horizontes menos intemperizados que se localizam a maiores profundidades, são

depositados superficialmente, resultando em substratos que não apresentam características químicas adequadas para sustentar a vegetação (SANCHES, 2002).

Essa é uma tendência em solos construídos e revegetados em áreas de mineração, uma vez que trabalhos de Yada (2011) em áreas de extração de cassiterita, e Nascimento (2015) em áreas de extração de scheelita, encontraram situação semelhantes em áreas com solos ambientalmente alterados pelos processos de mineração. Raij (1987) cita que os solos apresentam no decorrer do equilíbrio ganhos e perdas de MO, e que solos florestais apresentam teores mais elevados em relação a solos construídos, que frequentemente apresentam baixos teores de MO, sobretudo em áreas que ainda não atingiram a condição de equilíbrio do solo, o que confirma os resultados encontrados deste parâmetro na área ambientalmente alterada da pilha de resíduos P2.

Sendo a MO um atributo que contribui com as propriedades físicas, químicas e biológicas de um solo, como a estrutura, capacidade de retenção de água e cátions, auxiliando na disponibilidade de nutrientes para as plantas (RAIJ, 1987; LUCHESE, 2002), os seus teores são de grande importância para a manutenção da fertilidade do solo, além de ser sensível às práticas de manejo, agindo como um indicador eficiente no monitoramento de mudanças da qualidade do solo no decorrer do tempo (SHUKLA, 2006).

5.3.5 Relação entre CTC, argila e MO

A capacidade da troca de cátions (CTC) possui relação com as quantidades de cargas superficiais das partículas de argila e MO, influenciando nas propriedades químicas do solo, e favorecendo a disponibilidade de nutrientes as plantas, através da retenção de água e cátions de Ca, Mg, e K trocáveis, importantes na manutenção da fertilidade do solo. (RAIJ, 1987; TEDESCO, 1995; LOPES, 1998).

Na análise de correlação entre valores da CTC e partículas de argila e MO do solo, foram utilizados gráficos de dispersão, informando o grau de proximidade entre as duas variáveis, e análise de Regressão fornecendo uma equação matemática que descreve essa relação dos parâmetros das dez (10) amostras simples coletadas ao longo de cada área.

Foram encontrados os valores de ($p = 0,00012$) entre a CTC e MO em P3, e ($p = 0,00014$) em P1, indicando diferença significativa entre os parâmetros ($p < 0,05$). Em P2 ($p = 0,4754$), não há diferença significativa entre os parâmetros de CTC e MO, indicando que não existe uma relação entre as variáveis testadas.

O valor de $R^2 = 0,705$ em P3, e $R^2 = 0,896$ em P1 (Figuras 13 e 17) mostram que o grau de correlação entre as duas variáveis é de 70,5% e 89,6% respectivamente, consideradas correlações significativas, enquanto que $R^2 = 0,065$ em P2 (Figura 15) possui correlação não significativa de 0,6% entre as variáveis.

As Figuras 13 e 17 demonstram através do diagrama de dispersão que as áreas P3 e P1, apresentam correlação entre a CTC e MO, com os pontos se agrupando em torno de uma linha reta, demonstrando relação linear entre as duas variáveis, verificados pelos valores de R^2 e r (coeficiente de Pearson). Valores semelhantes foram encontrados em Freitas (2014) na avaliação de atributos químicos e físicos de solos sob vegetação nativa.

A correlação entre CTC e teor de MO foi maior em áreas sob vegetação nativa do que em solos com algum manejo, como os encontrados em Yada (2011) nas áreas de extração de cassiterita, em Canellas (2003) e Centurion (2001), avaliando solos sob diferentes manejos, onde ocorre correlação positiva entre CTC total e o teor de MO do solo.

Ocorreu maior correlação significativa e positiva entre a CTC e MO em P1, seguido de P3, devido aos elevados teores de MO, que retém maiores quantidades de bases de Ca e Mg trocáveis na sua superfície do solo, diminuindo as perdas por lixiviação, aumentando a CTC e a disponibilidade dos nutrientes para absorção pelas plantas.

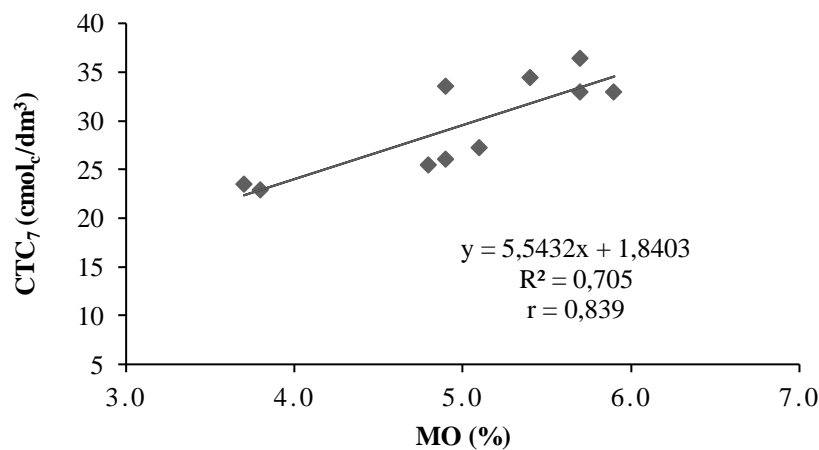


Figura 13 – Correlação entre os teores de matéria orgânica (MO) e a capacidade de troca de cátions (CTC) para os solos no ponto P3, em área nativa.

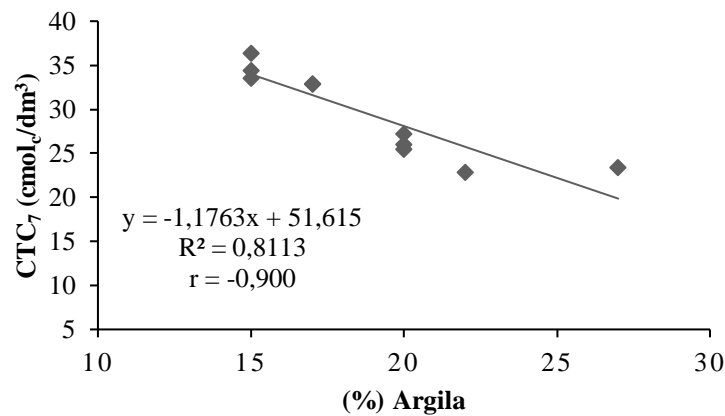


Figura 14 – Correlação entre os teores de argila e a capacidade de troca de cátions (CTC) para os solos no ponto P3 em área nativa.

As Figuras 15 e 16 referentes a P2, mostram que o diagrama de dispersão não apresenta correlação entre CTC e MO, e nem entre CTC e argila, com os pontos não se agrupando em torno da linha reta, sem relação linear entre as duas variáveis, verificada nos valores de R^2 e r .

Em P2 os solos apresentam grande dispersão nos teores de argila ao longo da área e baixos teores de MO (Figura 12), devido ao processo de construção do solo, que envolve a deposição de rejeitos da mina e seu recobrimento superficial com mistura de solos de vários perfis pedológicos, com diferentes teores de MO, e de elementos nutrientes. Solos construídos e em recuperação buscam o equilíbrio do ecossistema natural, ocorrendo assim uma correlação fraca e negativa entre a CTC e coloides de MO e argila (Figura 15 e 16), sendo que a CTC nesta área é resultado da elevada concentração da soma de bases (SB) de Ca e Mg no solo.

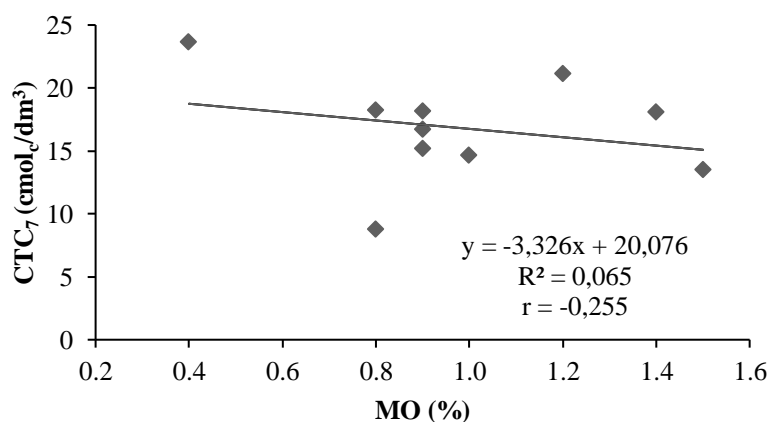


Figura 15 – Correlação entre os teores de matéria orgânica (MO) e a capacidade de troca de cátions (CTC) para os solos no ponto P2 em área de pilha de resíduos.

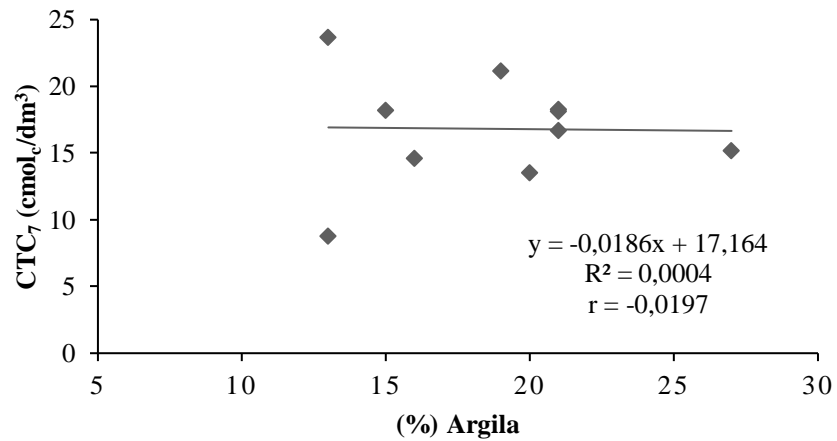


Figura 16 – Correlação entre os teores de argila e a capacidade de troca de cátions (CTC) para os solos no ponto P2 em área de pilha de resíduos.

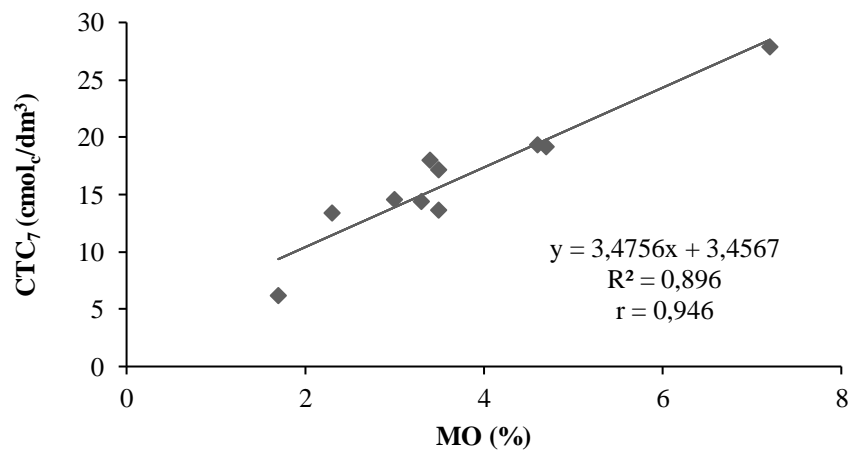


Figura 17 – Correlação entre os teores de matéria orgânica (MO) e a capacidade de troca de cátions (CTC) para os solos no ponto P1 em área de plantio de eucalipto.

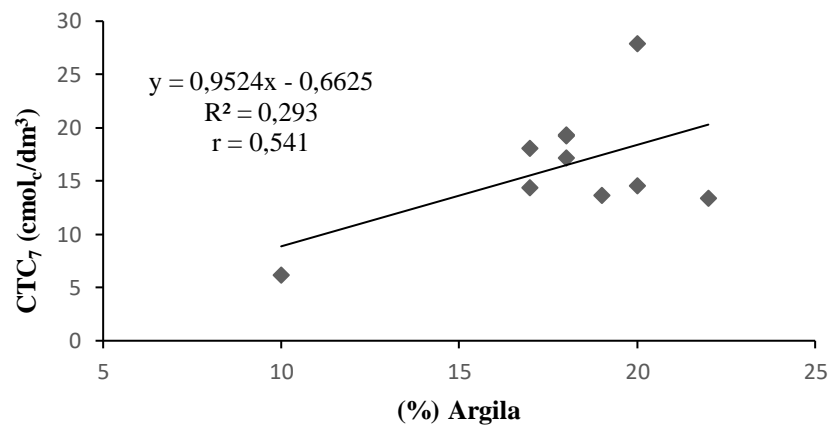


Figura 18 – Correlação entre os teores de argila e a capacidade de troca de cátions (CTC) para os solos no ponto P1 em área de plantio de eucalipto.

Por apresentar relação direta com a fertilidade do solo, fica demonstrado que quanto maior a CTC, maior a fertilidade do solo, e isso se deve à elevada soma de bases, e ao maior teor de MO do solo, sendo estas as principais fontes de fornecimento de nutrientes do solo. Esta relação ocorre também com a textura, em áreas com solos um pouco mais argilosos, que podem contribuir para apresentar CTC superiores (LOPES, 1998).

Estas partículas de coloides favorecem a CTC, retendo e liberando cátions, sendo a MO o componente do solo que mais contribui, entre 56 e 82% da CTC de solos, sob condições tropicais (RAIJ, 2011), através da geração de cargas na camada superficial do solo, com maior relevância em solos pouco argilosos e de textura mais arenosa. (FREITAS, 2014).

Através dos dados apresentados na Tabela 8, são descritas as correlações encontradas entre a CTC₇ e o teor de argila e MO, e a concentração de cátions básicos, nos solos das áreas analisadas, através da correlação de Pearson (r), demonstrando valores no intervalo entre -1 e +1. Existe correlação significativa e positiva entre os valores de CTC₇ e os elementos Ca e Mg em P1, P2 e P3 devido à ocorrência da deposição de poeira da rocha calcária nos solos em todas as áreas, elevando a concentração destas bases nas superfícies, e saturando o complexo de troca dos coloides do solo, nas áreas de estudo.

Tabela 8 - Correlação de Pearson (r) entre a capacidade troca catiônica (CTC₇) com os coloides de argila, MO e bases trocáveis presente nos solos.

Pontos	Parâmetros				
	Argila	MO	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
P1	0,54	0,95	0,98	0,95	0,68
P2	-0,02	-0,26	0,62	0,72	0,51
P3	-0,90	0,84	0,98	0,78	-0,27

Fonte: Autoria própria.

5.3.6 Disponibilidade de Fósforo

O teor de fósforo (P) na área P3 foi elevado e na classe “muito alto” de disponibilidade de nutrientes (Tabela 1 e 3), em PB foi “alto”, enquanto nas áreas P1 e P2 foram “muito baixo”. As médias entre as áreas não são homogêneas ($p = 0,00016$), com diferença significativa entre P3 e as médias de P1 e P2 (Tabela 5).

Nas três áreas, os valores possuem média e mediana próximos, e desvio padrão baixo, demonstrando que o elemento fósforo se encontra homogeneamente distribuído em cada área.

O fósforo encontra-se na solução do solo em teores geralmente muito baixos (RAIJ, 1991), tornando-se disponível pela decomposição da matéria orgânica e intemperização dos minerais de fosfatos inorgânicos da rocha de origem. Possui pouca mobilidade por lixiviação, sendo perdido em grandes quantidades principalmente por remoção de materiais do solo (LOPES, 1998).

Na área P3 o valor de fósforo foi muito alto, e de acordo com Rheinheimer (2000), a MO é uma fonte natural de fósforo orgânico no solo, contribuindo com 20 a 80% do fósforo total na camada 0–20 cm, proveniente da decomposição dos resíduos vegetais e orgânicos depositados no solo, aumentando sua concentração na camada mais superficial.

Em P3 ocorre menor perda de fósforo do que em P2, devido a mata nativa, onde ocorre grande adsorção do fósforo nos coloides de MO e menor perdas por lixiviação.

O teor de fósforo em P2 foi baixo, devido à sua perda pelo processo de mistura de vários tipos de solos, com diversos perfis de horizontes, e diferentes características químicas e físicas, com menor concentração de cobertura vegetal, baixa decomposição de serrapilheira e pouca MO superficial.

5.3.6 Micronutrientes

Os micronutrientes são requisitados em menor quantidades pelas plantas, sendo considerados elementos-traços, e sua concentração natural no solo é influenciada em grande parte pelo material de origem, com porcentagens de saturação no complexo de troca muito baixas e inexpressivas comparado aos macronutrientes essenciais.

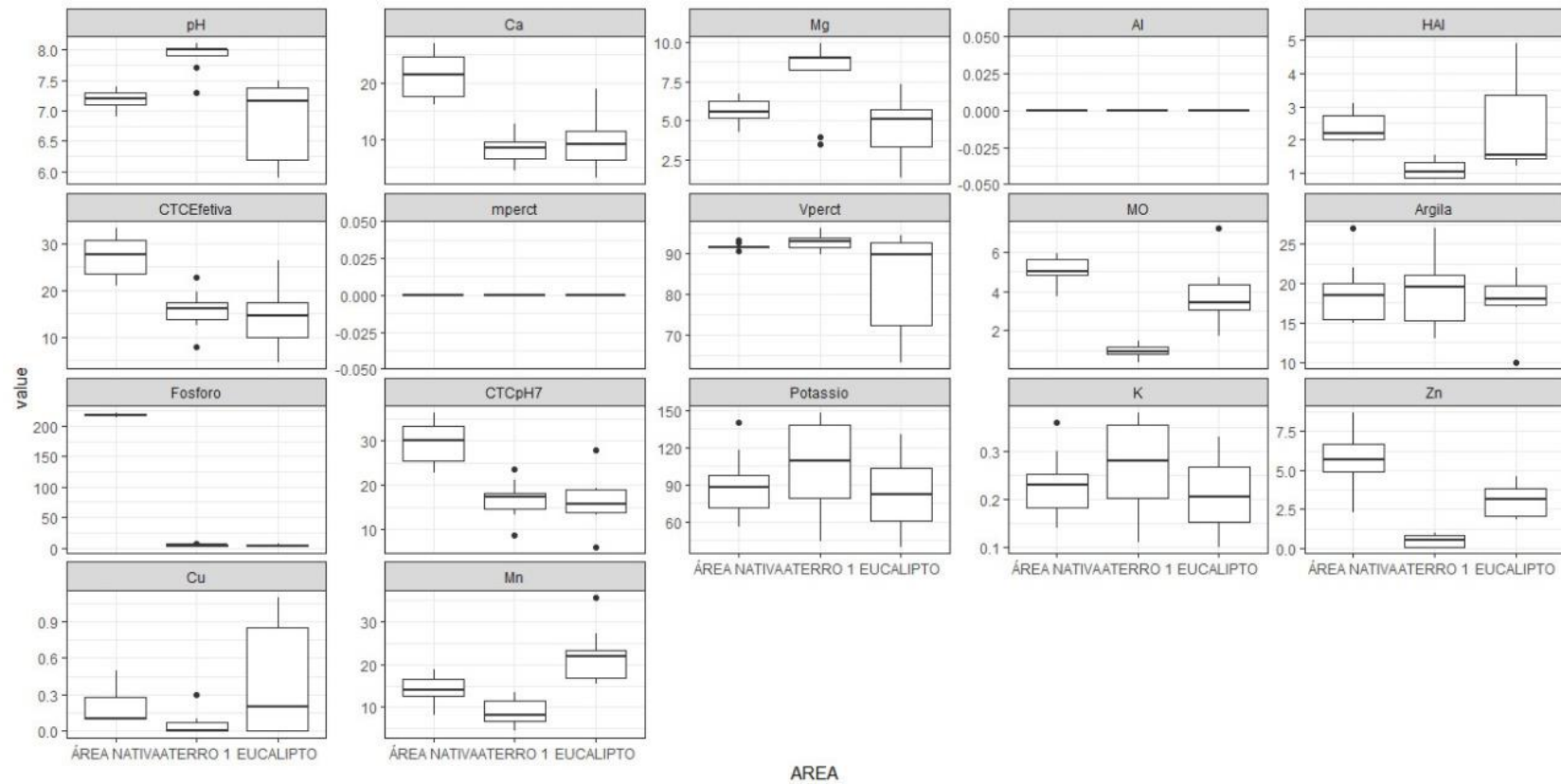
O teor de Zn nas áreas se enquadram na classe “alto” de disponibilidade de nutrientes (Tabelas 1 e 3), com médias não homogêneas ($p = 0,0002$), e diferença significativa entre as áreas P1, P2 e P3 (Tabela 5).

O teor de Mn nas áreas se enquadram na classe “alto” de disponibilidade de nutrientes (Tabelas 1 e 3), com médias consideradas homogêneas ($p = 0,0633$), e diferença significativa entre as médias das áreas P1, P2 e P3 (Tabela 5).

O teor de Cu se encontra na classe “baixo” a “médio” na disponibilidade de nutrientes (Tabelas 1 e 3) em P1, P2 e P3, e mais elevada em PB, sem diferença entre as médias das áreas ($p = 0,1383$).

Na área P1, P3 e PB, os teores de micronutrientes são maiores que em P2, provavelmente devido aos solos de formação mais antiga, e a camada vegetal mais densa, ocorrendo a maior ciclagem dos micronutrientes, com os elementos Cu e Zn apresentando afinidade com a fração matéria orgânica do solo (MELO, 2008).

Figura 12 – Caracterização dos parâmetros analisados, utilizando o Diagrama de Boxplot.



Fonte: Autoria própria.

Legenda – ÁREA NATIVA: P3; ATERRO 1: P2; EUCALIPTO: P1

6. CONCLUSÃO

Na caracterização e avaliação da qualidade dos solos superficiais em áreas de mineração do calcário, os diferentes indicadores físicos e químicos demonstraram que a área nativa obteve resultados mais próximos aos indicados na literatura, seguido pela área de plantio do eucalipto, enquanto que a área de pilha de estéreis e rejeitos apresentou maiores restrições do solo ao desenvolvimento das plantas.

Os solos das áreas apresentaram elevados valores de pH, CTC, soma de bases, e saturação por bases de Ca e Mg, baixa acidez, e ausência de Al fitotóxico,

A área de mata nativa obteve melhores resultados físicos e químicos, com elevados teores de MO devido a decomposição de materiais acumulados na superfície do solo, elevando a ciclagem dos macro e micronutrientes, com boa disponibilidade de absorção pelas plantas, maior condutividade hidráulica e menor densidade do solo, condições propícias ao crescimento radicular das plantas.

A área de pilha de resíduos possui maiores impedimentos ao crescimento de plantas de grande porte, com solos superficiais mais rasos na cobertura da pilha, e maiores diferenças físicas e químicas, proveniente da mistura de materiais e solos, apresentando baixa concentração do elemento fósforo e MO, com vegetação ainda incipiente e baixa ciclagem de nutrientes, menor condutividade hidráulica e maior densidade, podendo prejudicar e retardar o desenvolvimento radicular das plantas.

Para elevar a fertilidade do solo na área da pilha de resíduos (P2), conforme os valores encontrados, recomenda-se a correção do solo através de adubação mineral e orgânica de cobertura, com posterior manutenção periódica, sendo que para espécies florestais utiliza-se o adubo mineral simples, como o sulfato de amônio e ureia, fontes de nitrogênio.

Devido à baixa concentração do elemento fósforo no solo desta área, é recomendado a utilização de maiores quantidades fosfato natural, como fonte de fósforo, e de menores quantidades de cloreto de potássio e sulfato de potássio, como fontes de potássio. Podem ser aplicados manualmente e uniformemente sobre a superfície do solo, podendo ou não ser incorporado, e onde as raízes das plantas possam melhor aproveitá-los.

Além do adubo mineral convencional, pode-se utilizar adubo orgânico, através da utilização de resíduos disponíveis na própria empresa, como as cinzas que se caracterizam por ser um material com grandes concentrações de potássio, e obtidas através de queima da madeira

em forno, no aquecimento do calcário para a produção da cal, podendo ser utilizado sem prévio preparo.

É indicado o uso de adubação verde através da coleta e utilização de restos de material vegetal que se encontram soltos na superfície da mata nativa (P3) e área de plantio de eucalipto (P1), compostos por folhas e pequenos galhos em decomposição, contribuindo para elevar os teores de MO através de microrganismos decompositores presentes na serrapilheira, liberando nutrientes no solo. Também fornece sementes de plantas herbáceas, arbustivas e arbóreas, e protege a superfície do solo contra os raios solares, conservando sua umidade.

É recomendado espalhar o material manualmente na superfície, formando uma camada de no mínimo 10 cm de espessura, com sua incorporação superficial a uma profundidade máxima de 5 cm para que não seja afetado o sistema radicular das árvores, melhorando assim o seu efeito.

Este estudo confirmou a importância da existência de áreas florestais preservadas na empresa, a fim de manter a qualidade física e química do solo, auxiliando na preservação e conservação do ecossistema existente. A metodologia utilizada pode ser aplicada, permitindo o monitoramento dos solos ao longo do tempo, servindo de parâmetro em futura restauração de áreas, através do plantio de espécies florestais.

REFERÊNCIAS

- AITA, C.; CERETTA, C. A. Manejo e conservação do solo. 2009. Graduação Tecnológica em Agricultura Familiar e Sustentabilidade. **Curso de Educação a Distância**, UFSM. Apostila.
- ALVES, M.C.; SUZUKI, L.G.A.S. & SUZUKI, L.E.A.S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. **R. Bras. Cie. Solo**, 31:617-625, 2007.
- ARAÚJO, F. S. *et al.* Florística da vegetação arbustivo-arbórea colonizadora de uma área degradada por mineração de caulim, em Brás Pires, MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.6, p.983-992, 2005.
- ARAÚJO, E. A de *et al.* Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v.5, n.1, p.187-206, 2012.
- BATES, J. **Barragens de Rejeitos**. 1ª edição. São Paulo: Signus Editora, 2002. 122 p.
- BAPTISTA, C. F. A. **Metodologia de avaliação de impactos ambientais para o sistema de gestão ambiental proposto pela NBR ISSO 14001:2004, estudo de caso mina do mangueirão, Caçapava do Sul**. 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, RS, 2015
- BARRETO, A. C.; LIMA, F. H. S.; FREIRE, M. B. G.; ARAÚJO, Q. R. FREIRE, F. J. Característica química e física de um solo sob floresta, sistema agroflorestal e pastagem no sul da Bahia. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 19, n.4, p.415-425, 2006.
- BRADY, N.C., and Weil, R.R. 1999. The nature and properties of soils. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ.
- BRASIL. RAIMUNDO COSTA DE LEMOS. (org.). Ministério da Agricultura. DNPA. **Levantamento de Reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Recife: Divisão de Pesquisa Pedológica, 1973. 431 p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030)**. Brasília: MME, 2010 178 p.1v.
- CASTRO, C.E.F. *et al.* Plantas aromáticas e medicinais (plantas bioativas). **Série Reuniões técnicas**, 10. Campinas: Consepa, 2005. p. 1-32.
- CARVALHO, P. E. R. Espécies arbóreas brasileiras. Brasília: **Embrapa Informação Tecnológica**; Colombo: Embrapa Florestas, 2003. v. 1, p. 169-175.
- CARVALHO, D. B. *et al.* Fertilidade do solo em integração lavoura-pecuária na região de Guarapuava/PR. **Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais**. Guarapuava, 2005, v.3, n.1, p.57-65
- CERRI, C. C.; CHAPLOT, V. Ciclagem de nutrientes e sustentabilidade agrícola. In: I Workshop sobre Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, 1999, Campinas (SP). **Anais do I Workshop sobre Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**. Campinas, (SP), 1999.
- EMATER. EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENÇÃO RURAL – 2013.

- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 1 ed. Rio de Janeiro: 1979. **EMBRAPA-CNPS**, 1979. Paginação irregular
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2 ed. Rio de Janeiro: **EMBRAPA-CNPS**, 1997. 212p.
- Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental / Yeda Maria Malheiros de Oliveira, Edilson Batista de Oliveira, editores técnicos. – Brasília, DF: **Embrapa**, 2017. PDF (110 p.)
- DAMASCENO, G. C. **Geologia, Mineração e Meio Ambiente**. 1. ed. Cruz das Almas: UFRB, 2017. v. 1. 64p.
- DE LUCA, F. J.; GASTALDON, M. C. Desenvolvimento sustentável e a recuperação das áreas degradadas abandonadas pela mineração de carvão na região Sul do Estado de Santa Catarina. **Revista Tecnologia e Ambiente**, v.5, n.2, p.19-33, 1999.
- DIAS, L. E. & GRIFFITH, J. J. Conceituação e Caracterização de Áreas Degradadas. In: Dias, L.E. & Mello, J.W.V. (eds.). Recuperação de Áreas Degradadas. Univ. Federal de Viçosa, Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, 1998. 251p.
- DIAS, L. **Caracterização de substratos para fins de recuperação de áreas degradadas**. In: DIAS, L.; MELLO, J. (Ed.). Recuperação de áreas degradadas. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. SOBRAGE, p.27-44, 1998.
- FERNANDES, G. D. **Impactos ambientais em área ocupada por necrópole no município de Caçapava do Sul – RS**. 2017. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2017
- FONTES, M. P. F. Estudo Pedológico Diminui Impactos da Mineração. **Revista da Cetesb de Tecnologia AMBIENTE**, São Paulo, 1991, v. 5, n.1, p. 58-62.
- FLORES, Bruno Acosta. Aproveitamento de resíduos oriundos da mineração na produção de blocos ecológicos. 2017. 62 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, RS, 2017.
- FREDDI, O. S. et al. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 627-636, 2007.
- GONÇALVES, J. L. M. et al. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J. L.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 3-57.
- Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). **Gestão para a sustentabilidade na mineração: 20 anos de história / Instituto Brasileiro de Mineração**; organizadores, Cláudia Franco de Salles Dias, Rinaldo César Mancin, M^a Sulema M. de Budin Pioli. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2013. 168 p.
- JIMENEZ, R. L. et al. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 116–121, 2008
- JUMA, N. G. 1999. Introduction to Soil Science and Soil Resources. Volume I in the Series "The Pedosphere and its Dynamics: A Systems Approach to Soil Science." Salman Productions, Sherwood Park. 335 pp

KARLEN, D. L., MAUSBACH, M. J., DORAN, J. W., CLINE, R. G., HARRIS, R. F., SCHUMAN, G. E. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, v.61, p.4-10, 1997.

KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia**: relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979. 263p.

LOPES, Alfredo Scheid. **Manual Internacional de Fertilidade do Solo**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1998. 177 p.

MALAVOLTA, E.; **Manual de nutrição mineral de plantas**. Ed. Agronômica Ceres. São Paulo, 2006. 638 p.

MACHADO, P. L. O. de A. Compactação de solo e crescimento de plantas - como identificar, evitar e remediar. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2003. **Embrapa Solos**, Documentos n. 56.

MELO, E. E. C.; Nascimento, C. W. A.; Santos, A. C. Q.; Silva, A. S. Disponibilidade e fracionamento de Cd, Pb, Cu e Zn em função do pH e tempo de incubação com o solo. **Ciência Agrotecnologia**, v.32, p.776-784, 2008

MOLLE: orden: *Shinus molle* Lineo, família: *Anacardiaceas*. **Flora, Fauna y Areas Silvestres, Santiago**, v. 4, n. 12, p. 41, 1990.

NASCIMENTO, A. R. V. J. **Atributos físicos e químicos de áreas degradadas pela mineração de scheelita na região tropical semiárido**. 2015. 79 f. Dissertação - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, UFRN, Natal, 2015.

OLIVEIRA JÚNIOR, JOSÉ BAPTISTA. **Desativação de empreendimentos mineiros: estratégias para diminuir o passivo ambiental**. São Paulo, 2001. 179 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Pulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

PEREIRA, M.G.; LOSS, A.; BEUTLER, S.J.; TORRES, J.L.R. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, p.508-514. 2010.

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

RAIJ, B.V. *et al.* **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Cargill, 1987. 170p.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, 1991. p.343.

REICHERT, J.M. *et al.* Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, 2003, v. 27, p. 29-48

REIS, A., ZAMBONIN, R. M.; NAKAZONO, E. M. Recuperação de áreas florestais degradadas utilizando a sucessão e as interações planta-animal. **Série Cadernos da Biosfera 14. Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica**. Governo do Estado de São Paulo. São Paulo, 1999. 42 p.

RHEINHEIMER, D.S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 211 f. Tese - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

Resolução Conama nº 001, de 23 de janeiro de 1986: Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 23 jan. 1986. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-230186.PDF>>. Acesso em: 16 de mar. 2023.

ROCHA, J. H. T. *et al.* Reflorestamento e recuperação de atributos químicos e físicos do solo. **Floresta e Ambiente**, v. 22, p. 299-306, 2015.

RONQUIM, Carlos Cesar. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. 2.ed. Campinas: Embrapa Territorial, 2020. 34 p.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Calcário e Dolomito. In: Adão Benvindo da Luz; Fernando A. Freitas Lins. (Org.). **Rochas & Minerais Industriais usos e especificações**. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2009, v. 1, p. 363-387.

SANCHES, A. C. **Adubação fosfatada e inoculação de leguminosas com Bradyrhizobium na recuperação de solo degradado pela mineração de cassiterita na região amazônica**. 2002. 96 f. (Tese Doutorado em agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, 2002.

SANTOS, E.G. – **Recuperação Ambiental na Disposição de Estéril em Mineração de Calcário**. Trabalho de conclusão de curso – Tecnologia em Mineração – UNIPAMPA, 2015.

SANTOS, H. G. dos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 ed. Brasília: EMBRAPA, 2018, 356 p.

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

SHUKLA, M.K.; LAL, R.; EBING ER, M. **Determining soil quality indicators by fator analysis**. **Soil Tillage Research**, v. 87, p. 194- 204, 2006.

SILVA, Gilson Pereira et al. Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito da mineração de ferro da Mina de Alegria, Mariana-MG. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36, n. 1, p. 45-52, 2006.

SILVA, Michelangelo de Oliveira. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, 2020, v. 6, n. 7, p. 47838-47855.

SILVA, José Otávio da. PRODUTO RT 38 PERFIL DO CALCÁRIO. Brasília: **Ministério de Minas e Energia**, 2009. 56 p.

SILVA, A. P. M., VIANA, J. P., CAVALCANTE, A. L. B. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - Ipea. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas**. Brasília, 2012. 46 p.

TAVARES, Sílvio Roberto de Lucena. **Curso de recuperação de áreas degradadas: a visão da Ciência do Solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008. 228 p.

TEDESCO, Marino José *et al.* **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: UFRGS, 5. d. 1995. 174 p.

TOY. T.J.; GRIFFITH, J.J.; RIBEIRO, C.A.A.S. Planejamento a longo prazo da revegetação para o fechamento de minas a céu aberto no Brasil. **Revista Árvore** v.25 n.4, p. 489. 2001.

SILVA, M.O. *et al.*, 2020 - Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo - **Brazil Journal of Development.**, Curitiba, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, jul. 2020.

SOCIEDADE BRASILEIRA DO SOLO – Núcleo Regional Sul. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio grande do sul e de Santa Catarina.** 11. ed. Porto Alegre: Comissão de Química e Fertilidade do Solo RS/SC, 2016. 376 p.

SOCIEDADE BRASILEIRA DO SOLO – Núcleo Regional Sul. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio grande do sul e de Santa Catarina.** 10. ed. Porto Alegre: Comissão de Química e Fertilidade do Solo RS/SC, 2004. 400 p.

TAIZ, L. e ZEIGER. Fisiologia Vegetal. Porto Alegre: 2004, **Artmed**, 719 p.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J., Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** 2009, v. 33, n. 4, p. 743-755.

ZANETTI, A. P.; FERREIRA, R. L. RCA/PCA UNIFICADOS. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 11, p. 83-99, 2017.

ZENG, X.; ZHANG, W.; CAO, J.; LIU, X.; SHEN, H.; ZHAO, X. Changes in soil organic carbon, nitrogen, phosphorus, and bulk density after afforestation of the “Beijing–Tianjin Sandstorm Source Control” program in China. **Catena**, v.118, p.186–194, 2014.

Central Florestal - Recuperação de Áreas Degradadas. 2019. Disponível em <<http://www.centralflorestal.com.br/2019/09/e-book-gratuito-recuperacao-de-areas.html>>. Acesso em 01/07/2020.

Brazilian Journal of Development. 2020. Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/13360>>. Acesso em 19/10/2021.

Prefeitura Municipal de Caçapava do Sul, Dados do Município. 2023. Disponível em: <<https://cacapavadosul.rs.gov.br/pagina/id/3/?dados-do-municipio.html>>. Acesso em 03/01/2023.

IBFlorestas - Instituto Brasileiros de Florestas. 2020. Disponível em <<https://www.ibflorestas.org.br/lista-de-especies-nativas/aroeira-pimenteira>>. Acesso em 04/01/2023.

Gismonti. Na sala com Gismonti, assuntos sobre Agronomia. 2010. Disponível em <<https://agronomiacomgismonti.blogspot.com/2010/07/materia-organica-do-solo.html>>. Acesso em 01/03/2023.

Sema – Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do RS, 2014. Disponível em <<https://sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201708/23150550-aer-rsbio-pedra-segredo.pdf>>. Acesso em 02/02/2023.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Solos Tropicais. 2019. Disponível em <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/neossolos>> Acesso em 10/02/2023.

Atlas Econômico do Rio Grande do Sul, Meio Ambiente. 2022. Disponível em <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/solos>>. Acesso em 16/12/2022.

Portal São Francisco – Árvores Brasileiras. 2023. Disponível em:
<<https://www.portalsaofrancisco.com.br/biologia/ingazeiro>>. Acesso em 08/01/2023.