

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**JADY CAROLINE ALVES**

**USO DE REJEITOS DE CALCÁRIO PARA PRODUÇÃO DE TECNOSSOLOS:  
ALTERNATIVA PARA DISPOSIÇÃO E POSSIBILIDADE DE RECUPERAÇÃO DE  
ÁREAS DEGRADADAS**

**Caçapava do Sul  
2022**

**JADY CAROLINE ALVES**

**USO DE REJEITOS DE CALCÁRIO PARA PRODUÇÃO DE TECNOSSOLOS:  
ALTERNATIVA PARA DISPOSIÇÃO E POSSIBILIDADE DE RECUPERAÇÃO DE  
ÁREAS DEGRADADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Jéssica Weiler

**Caçapava do Sul  
2022**

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).

A474u Alves, Jady Caroline

USO DE REJEITOS DE CALCÁRIO PARA PRODUÇÃO DE  
TECNOSSOLOS: ALTERNATIVA PARA DISPOSIÇÃO E  
POSSIBILIDADE DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS /

Jady Caroline Alves.

65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do  
Pampa, GEOLOGIA, 2022.

"Orientação: Jessica Weiler".

1. Uso de rejeitos. 2. Solos fabricados. 3. Recuperação de áreas degradadas. I.  
Título.

**JADY CAROLINE ALVES**

**USO DE REJEITOS DE CALCÁRIO PARA PRODUÇÃO DE TECNOSSOLOS:  
ALTERNATIVA PARA DISPOSIÇÃO E POSSIBILIDADE DE RECUPERAÇÃO DE  
ÁREAS DEGRADADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Geologia da Universidade Federal  
do Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do Título de Bacharel em Geologia

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 11 de Agosto de 2022.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Jéssica Weiler  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Igor Magalhães Clemente  
UNIPAMPA

---

Msc. Guilherme Pacheco Casa Nova  
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **IGOR MAGALHAES CLEMENTE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/08/2022, às 05:54, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **GUILHERME PACHECO CASA NOVA, Técnico de Laboratório Área**, em 18/08/2022, às 13:07, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JESSICA WEILER, PROFESSOR MAGISTERIO SUPERIOR - SUBSTITUTO**, em 18/08/2022, às 14:31, 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](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0897753** e o código CRC **6660E4CE**.

Dedico este trabalho a minha irmã, maior exemplo de amor na minha vida.

## AGRADECIMENTO

Sou grata ao Todo pela proteção e amor, senti a vossa presença ao meu lado durante todo o projeto de pesquisa.

Agradeço aos meus pais, Lídio e Jandira, minha irmã, Mel, minha avó, Benedita, por serem minha base de tudo, onde aprendi e construí o ser que eu sou. Gratidão por todo carinho e apoio durante a Graduação. Sou grata aos meus primos, Alex e Herik que considero como irmãos, as minhas primas, Lorryne, Gladce, ao meu tio Alan e a minha tia Zilma, por todo amor, carinho e apoio que recebi de vocês nos períodos difíceis, jamais esquecerei.

Sou grata também a minha avó Zenil (*in memoriam*), minha bisavó Branca (*in memoriam*), meu tio José Cesar (*in memoriam*), há um pouco de vocês no que eu sou e muito de vocês no que eu faço. Estarão sempre vivos dentro de mim.

Agradeço aos meus amigos, Crisleide, Pablo, Carol Kwamme, Jhully Leão, Bia, Diego, Gabriela Santana, Emilly, Gusta, Loruan, Jaqueline, Luam e Dani Wants por estarem comigo durante o período da graduação, sempre me apoiando, por não me deixarem desanimar, por acreditarem em mim quando nem mais eu acreditava.

Agradeço à minha orientadora Jéssica Weiler, por ter acreditado no meu potencial, pelo apoio, aprendizagem, por ter aceitado me orientar, sendo muito paciente comigo, durante esse período tão delicado e difícil pra mim, serei eternamente grata, foi uma honra.

Agradeço a Universidade Federal do Pampa, pelo ensino, pela estrutura dos laboratórios onde foi feito o trabalho. Sou grata por toda essa experiência e evolução do meu ser. Aos técnicos e monitores dos laboratórios, Angela, Guilherme e Henrique, por terem me ajudado na parte prática do meu trabalho e pela paciência comigo.

Aos estágios que tive oportunidade de fazer, na CPRM de Porto Velho-RO e a Geocentro Sondagens e Fundações de Santa Maria, sou muito grata pela aprendizagem, apoio e amizades que levarei por toda vida. Também aos projetos que participei durante a graduação, em especial ao Geoparque Caçapava do Sul e a Mesa concentradora.

Sou grata aos professores Igor Clemente, Luiz Delfino e ao Guilherme por aceitarem fazer parte da minha banca. Também agradeço aos meus queridos professores Felipe Guadagnin, Delia Pilar, Vinicius Matté, Cris, Régis e aos demais, por terem me ensinado não só geologia, mas por todo conhecimento passado durante a graduação, serei eternamente grata a vocês.

Agradeço as mineradoras Dagoberto Barcellos e Metropolitana por disponibilizarem os rejeitos. E por fim, sou grata por todos aqueles que me ajudaram de alguma forma durante a execução desse trabalho.

“Uma existência sem sonhos é como uma semente sem solo.”

Augusto Curry

## RESUMO

O despejo de rejeitos gerados na mineração, seja em módulos ou em barragens, podem causar danos ou desastres ambientais. Uma forma de reutilizar esses rejeitos seria na produção de Tecnossolos para a recuperação de áreas degradadas. O objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade da produção de Tecnossolos a partir de resíduos de calcário seguido de crescimento vegetal para uso em áreas de recuperação. Para garantir pH próximo à neutralidade, adicionou-se uma fonte de material ácido, através do rejeito pirítico. Também foi adicionada uma fonte de matéria orgânica. A análise do substrato produzido foi realizada por meio de atributos físicos como a granulometria, umidade e parâmetros de fertilidade, por meio do cultivo da aveia preta (*Avena strigosa*) e azevém (*Lolium multiflorum Lam*). Nos atributos físicos, a granulometria influencia na umidade do solo. Nas análises elementares, mostraram elementos químicos presentes em maiores teores nos Tecnossolos de maior porcentagem de rejeitos, em comparação com o solo controle. Todos os experimentos feitos com diferentes porcentagem de rejeitos forneceram nutrientes para a germinação de sementes. Os Tecnossolos mostram potencial para recuperação de áreas degradadas da mineração, quando misturados com solo.

**Palavras-chave:** Antropossolos; Resíduos de calcário; Rejeito pirítico; Reciclagem; Sustentabilidade na mineração.

## ABSTRACT

The dumping of tailings generated in mining, whether in modules or in dams, can cause damage or environmental disasters. One way to reuse these tailings would be in the production of Technosols for the recovery of degraded areas. The objective of this work is to evaluate the possibility of producing Technosols from limestone residues followed by plant growth for use in recovery areas. To ensure a pH close to neutrality, a source of acidic material was added through the pyritic tailings. A source of organic matter was also added. The analysis of the substrate produced was performed through physical attributes such as granulometry, moisture and fertility parameters, through the cultivation of black oat (*Avena strigosa*) and ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam). In the physical attributes, the granulometry influences the soil moisture. In the elemental analyses, chemical elements were present at higher levels in the Technosols with the highest percentage of tailings, compared to the control soil. All experiments performed with different percentages of tailings provided nutrients for seed germination. Technosols show potential for recovery of degraded mining areas, when mixed with soil.

**Keywords:** Anthrosols; Limestone waste; Pyrite waste; Recycling; Mining sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Mapa de situação e localização da área de estudo.....	19
Figura 02 – Mapa de situação da área de estudo.....	20
Figura 03 – Mapa geológico simplificado das unidades do ESRG.....	21
Figura 04 – Mapa geológico simplificado da região de Caçapava do Sul.....	23
Figura 05 – Variantes da recuperação ambiental em áreas degradadas.....	29
Figura 06 – Preparação da amostra de rejeito de calcário, com quarteador e almofariz e pistilo e moagem do material.....	32
Figura 07 – Preparação da amostra de concentrado pirítico, com a britagem e moagem do material.....	33
Figura 08 – Titulação feita pelo método ABA mostrando pH próximo a 7, marcando o ponto de virada.....	36
Figura 09 – Esquema da montagem dos Tecnosolos nos tubos de PVC.....	37
Figura 10 – Experimentos desmontados e colocados para secar a luz do sol.....	38
Figura 11 – Os 12 experimentos montados e colocados ao ar livre.....	42
Figura 12 – Gráfico de dispersão do material passante em cada abertura das peneiras.....	43
Figura 13 – Apresentando o crescimento vegetal referente aos 56 dias após o plantio das sementes.....	46
Figura 14 – Mostrando os 12 experimentos seguindo a ordem de porcentagem de rejeitos...47	47
Figura 15 – Gráfico apresentando a diferença observada no experimento em relação a sua massa vegetal seca (g).....	48
Figura 16 – Gráfico comparativo do teor de magnésio entre os Tecnosolos dos experimentos e sua vegetação.....	49
Figura 17 – Gráfico comparativo do teor de silício entre os Tecnosolos dos experimentos e sua vegetação.....	49
Figura 18 – Gráfico comparativo do teor de cálcio entre os Tecnosolos dos experimentos e sua vegetação.....	50
Figura 19 – Gráfico comparativo do teor de alumínio entre os Tecnosolos dos experimentos e sua vegetação.....	50
Figura 20 – Gráfico comparativo do teor de ferro entre os Tecnosolos dos experimentos e sua vegetação.....	51

Figura 21 – Gráfico comparativo do teor de enxofre entre os Tecnosolos dos experimentos e sua vegetação.....	51
Figura 22 – Gráfico comparativo do teor de potássio entre os Tecnosolos dos experimentos e sua vegetação.....	52
Figura 23 – Gráfico comparativo do teor de fósforo entre os Tecnosolos dos experimentos e sua vegetação.....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Impactos ambientais e medidas mitigadoras na mineração de calcário.....	27
Tabela 02 – Resultado do teste de balanço ácido base para os rejeitos de pirita e calcário.....	36
Tabela 03 – Tabela granulométrica.....	39
Tabela 04 – Quantidades da massa em gramas utilizados para o experimento.....	41
Tabela 05 – Caracterização granulométrica das amostras de Tecnosolos.....	42
Tabela 06 – Apresenta o teor de umidade presente em cada amostra.....	44
Tabela 07 – Mostra a porcentagem dos elementos químicos presente no Tecnosolos.....	44
Tabela 08 – Escala pH para todos os experimentos.....	44
Tabela 09 – Diagnóstico para acidez do solo e calagem dos experimentos.....	45
Tabela 10 – Diagnóstico para macronutrientes e recomendação de adubação NPK-S dos experimentos.....	46
Tabela 11 – Diagnóstico para micronutrientes e relações molares.....	46
Tabela 12 – Apresenta o resultado da taxa de germinação.....	47
Tabela 13 – Apresenta resultado da massa vegetal (g).....	49
Tabela 14 – Mostra a porcentagem dos elementos químicos presentes no tecido vegetal.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

n. – número

p. – página

f. – folha

cap. – capítulo

v. – volume

$\text{CaCO}_3$  – carbonato de cálcio

NaOH. – hidróxido de sódio

g. – gramas

kg. – quilos

ABA. – balanço ácido-base

AP. – potencial de acidez

NP. – potencial de neutralização

PRNT. – poder relativo de neutralização total

mL – mililitro

b. – branco

t. – tonelada

pH. – potencial hidrogeniônico

C. – constante

N. – normalidade

Eq. – equação

PRAD's. – planos de recuperação de áreas degradadas

Ma - Massa da água

Ms - Massa sólida

U - umidade

ANM - Agência Nacional de Mineração

CQFS - Comissão de Química e Fertilidade do Solo, Núcleo Regional Sul

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
2.1 Objetivo geral.....	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
<b>3 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>18</b>
<b>4 ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>19</b>
4.1 Geologia regional.....	20
4.2 Geologia local.....	21
<b>5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>22</b>
5.1 Origem do Calcário e formação do Mármore.....	22
5.2 Gênese dos solos carbonáticos.....	23
5.3 Mineração de calcário e carvão mineral.....	23
5.4 Impactos ambientais da mineração.....	25
5.5 Recuperação de áreas mineradas.....	27
5.6 Tecnosolos.....	29
<b>6 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>30</b>
6.1 Coleta e preparação das amostras.....	31
6.2 Balanço Ácido-base.....	34
6.3 Tecnosolos.....	37
6.3.1 Montagem dos vasos para crescimento vegetal.....	37
6.3.2 Caracterização dos materiais selecionados.....	38
6.3.3 Granulometria e classificação textural dos Tecnosolos.....	38

6.3.4 Teor de umidade do Tecnosolos.....	39
6.3.5 Análise elementar dos Tecnosolos.....	40
6.3.6 Análise química básica do Tecnosolos.....	41
6.4 Análises de crescimento vegetal, parâmetros químicos e físicos.....	41
<b>7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>41</b>
7.1 Tecnosolos.....	41
7.1.1 Granulometria dos Tecnosolos.....	43
7.1.2 Teor de umidade.....	44
7.1.3 Análise elementar dos Tecnosolos.....	45
7.1.4 Análise química básica.....	46
7.2 Análises de crescimento vegetal, parâmetros químicos e físicos.....	46
7.2.1 Análises de crescimento vegetal.....	47
7.2.2 Parâmetros físicos.....	48
7.2.3 Análise elementar da vegetação.....	49
7.3 Correlação da análise elementar dos Tecnosolos e sua vegetação.....	50
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Diversos impactos ambientais estão associados à mineração, incluindo o desmatamento, a degradação do solo e o acúmulo de grandes quantidades de rejeitos em superfície (WEILER et al., 2019). As atividades de mineração geram uma grande quantidade de resíduos de rochas e rejeitos que são depositados na superfície do solo, os quais são frequentemente muito instáveis e podem se tornar fontes de degradação do meio ambiente na área da mina e ao seu entorno (WONG, 2003).

Segundo Sánchez (2015) o termo degradação ambiental significa “qualquer alteração adversa dos processos, funções ou componentes ambientais”. A degradação das propriedades físicas do solo provém dessas influências, caracterizada principalmente pela compactação do solo, baixa infiltração de água, prejudicada aeração e intensificação de processos erosivos (LONGO et al., 2011).

O uso de resíduos orgânicos ou inorgânicos, em misturas ou em aplicação simples, para a recuperação de áreas degradadas é uma aposta atrativa ao nível econômico, pois contribui para a reutilização e valorização de subprodutos decorrentes das atividades humanas cujo destino é normalmente o aterro, compostagem ou incineração (MARCIAS, 2004). Os Tecnosolos são solos constituídos por quantidade significativa de materiais criados ou fortemente alterados pelas atividades humanas. Diz-se do solo cuja formação não ocorre naturalmente na superfície terrestre na ausência de ação antrópica (SILVA, 2017).

Uma das principais aplicações dos estudos de Tecnosolos tem sido sua recuperação para permitir o uso sustentável e livre de riscos maiores (SCHAEFER, 2015). Apresentam 20% ou mais de artefatos humanos em uma profundidade de um metro; são encontradas matérias artificiais resistentes; camadas de materiais inconsolidados; podem ser recobertos por um horizonte de solo natural que permite o reflorestamento, e estão presentes em aterros, rodovias, áreas urbanas e áreas mineradas (SOUZA, 2018).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade da produção de Tecnosolos a partir de resíduos de calcário e materiais auxiliares, seguido de crescimento vegetal para uso em áreas de recuperação.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar os materiais selecionados na produção do substrato produzido, denominado Tecnosolo.
- Analisar os atributos físicos dos Tecnosolos: granulometria e umidade.
- Analisar os atributos químicos dos Tecnosolos: pH, análise elementar e química básica.
- Análise elementar do tecido vegetal: elementos químicos presentes.
- Avaliar o solo em termos de fertilidade: macro e micronutrientes e matéria orgânica.

## **3 JUSTIFICATIVA**

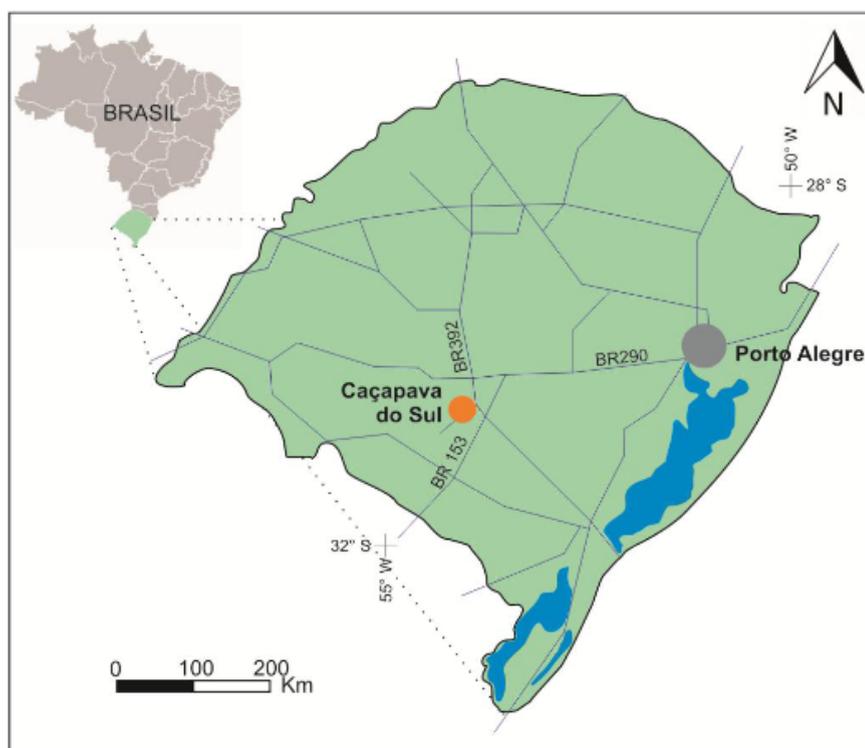
A recuperação das áreas degradadas na mineração é exigida por lei. Além disso, os resíduos gerados no beneficiamento mineral podem causar impactos onde são dispostos. Entretanto, se os mesmos forem misturados estrategicamente a materiais que proporcionem pH, nutrientes e matéria orgânica em níveis compatíveis a um solo, estes podem ser utilizados na própria recuperação das áreas da mina.

Então, dentro de uma mineradora é possível que a disposição de rejeitos em superfície se torne menos danosa ao meio ambiente. Assim, pretende-se mostrar que o aproveitamento dos rejeitos para a recuperação de áreas degradadas, promoveria melhorias econômicas e ambientais aos empreendimentos mineiros.

#### 4 ÁREA DE ESTUDO

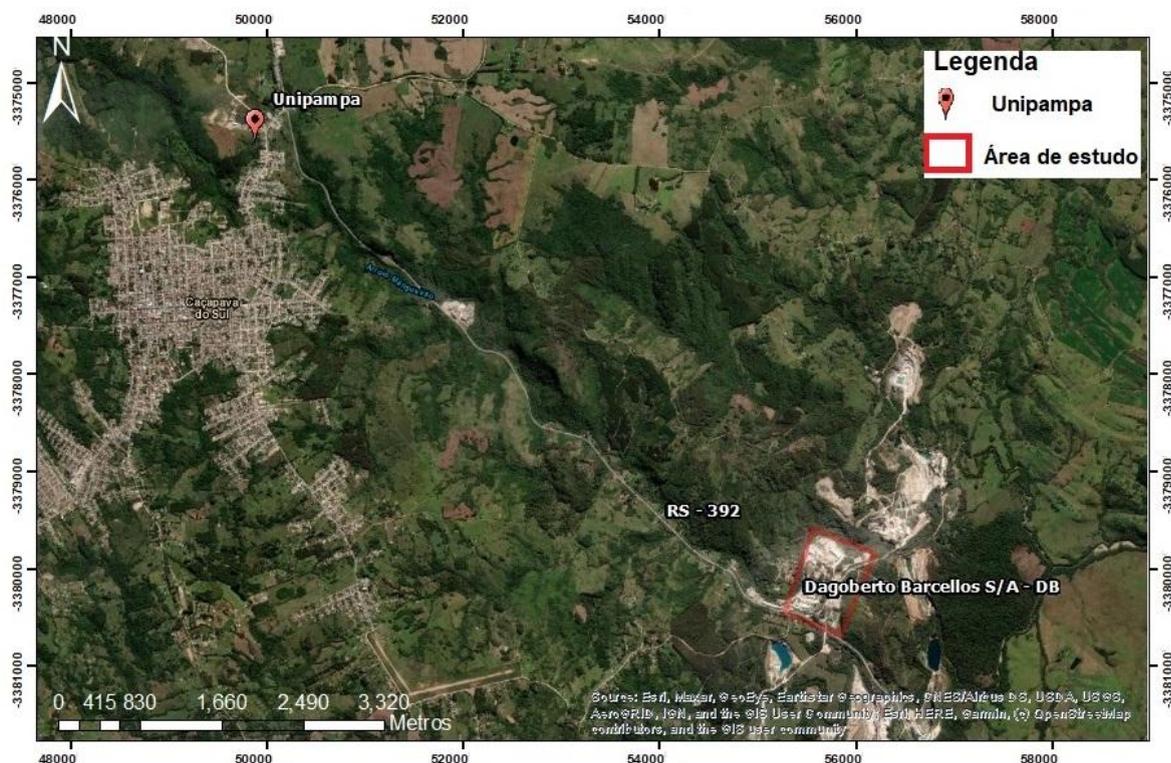
A área de estudo está localizada na porção central do estado do Rio Grande do Sul, no município de Caçapava do Sul (Figura 01). Com uma área territorial de 3.047,113 Km<sup>2</sup> (IBGE, 2015). Distante a 259 km da capital Porto Alegre pela BR 290, próxima do cruzamento das rodovias RS 357 e BR 392, a área de estudo está inserida na empresa de mineração de calcário Dagoberto Barcellos S/A - DB (Figura 02).

Figura 01 – Mapa de localização de Caçapava do Sul.



Fonte: Lopes, 2012.

Figura 02 – Mapa de situação da área de estudo.



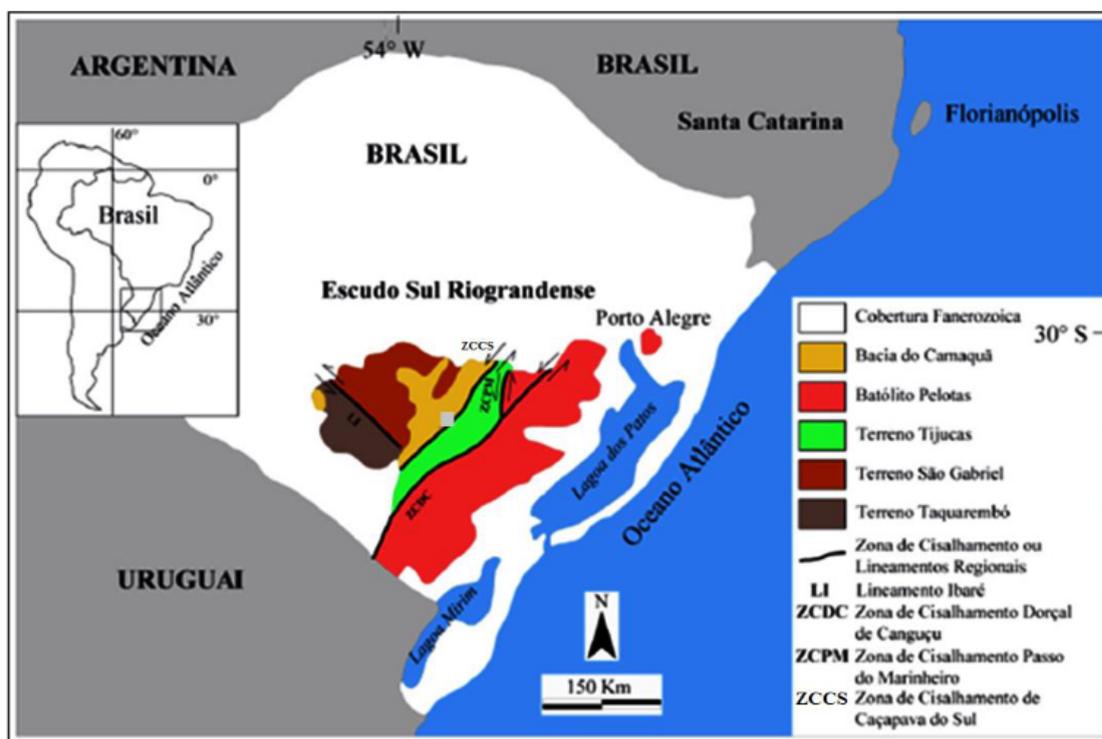
Fonte: Autora.

#### 4.1 Geologia Regional

A área está inserida no domínio do Escudo Sul-rio-grandense (ESRG), onde a porção meridional da faixa móvel Província Mantiqueira (Hasui et al., 1975; Almeida et al., 1981), há uma predominância de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares pré-paleozóicas, associando sua gênese aos ciclos Transamazônico (principalmente em fragmentos paleoproterozóicos cujos associados ao Cráton Rio de La Plata) e Brasileiro/Pan-Africano. Ao longo do Neoproterozóico (900 – 500 Ma), esta área configurou-se como importante zona de acreção e retrabalhamento crustal (SOLIANI Jr., 1986; BORBA, 2006).

O ESRG subdivide-se nos terrenos Taquarembó, São Gabriel, Tijucas, Pelotas e a bacia pós-colisional do Camaquã (Figura 03), dispostos como faixas alongadas de direção NE-SW, e limitadas por zonas de cisalhamento dúcteis de escala continental (LOPES, 2012).

Figura 03 - Mapa geológico simplificado das unidades do ESRG.



Fonte: BICCA et al, 2013.

#### 4.2 Geologia local

A região de Caçapava do Sul é conhecida pela exploração de rochas metassedimentares, pertencentes ao Complexo Passo Feio, que está inserido no Domínio São Gabriel (Figura 04).

O Complexo Granítico Caçapava do Sul é descrito por Bitencourt (1983) como constituído por dois corpos intrusivos, onde o maior deles apresenta 250 km<sup>2</sup> de extensão no maior eixo. Em geral, é formado por três fácies principais, dentre elas: a biotita granitóide, que são as rochas de coloração escura com altos teores de biotita e allanita como minerais acessórios característicos. O leucogranitóide, que são rochas de coloração rósea com baixos teores de minerais máficos; e o granitóide transicional, com composições intermediárias entre as duas primeiras fácies (NARDI E BITENCOURT,1989).

A interação entre a intrusão do Complexo Granítico Caçapava do Sul sob as rochas encaixantes da Formação Passo Feio acabou por promover efeitos dinamotermiais bastantes significativos, gerando a formação de um domo termal à época da intrusão. Os eventos metamórficos (M1 e M2) que afetaram a região variam da fácies xisto verde até a fácies

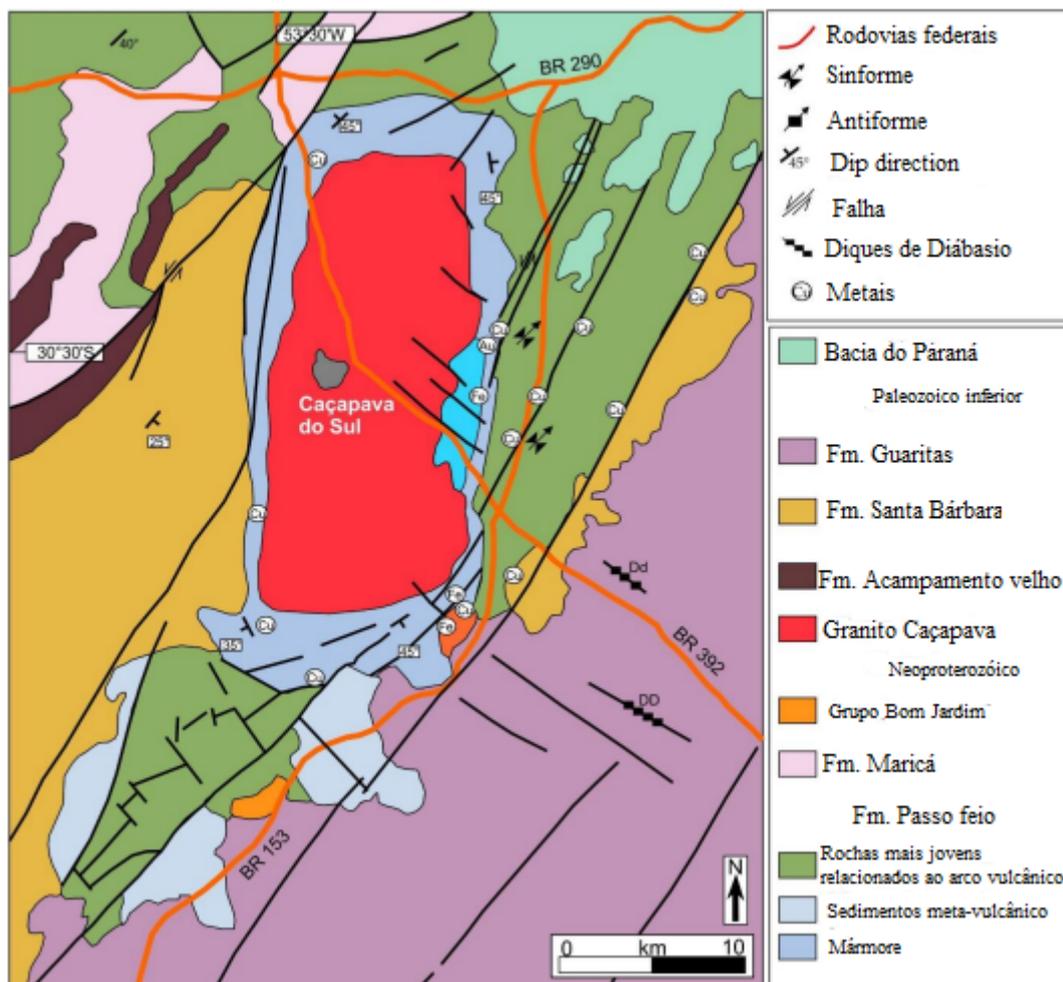
anfíbólito, tendo um aumento do grau metamórfico em direção às intrusões graníticas (BITENCOURT, 1983; DIAS, 2020).

Os mármore presentes nas minas da região são dolomíticos impuros e têm estrutura lenticular com alto grau de fraturamento e apresentam contatos nítidos. Há bandas milimétricas a centimétricas irregulares e descontínuas, com colorações variando de branco, cinza, verde a rosa. A microestrutura predominante é granoblástica com grãos equidimensionais (BORTOLOTTI, 1986).

Entre as substâncias das rochas carbonáticas, que são constituídas principalmente por calcita e ou dolomita estão às impurezas que serão descartadas como rejeito, como silicatos, fosfatos, sulfetos, sulfatos, óxidos e matéria orgânica (MINEROPAR, 2015).

No corpo de mármore, a fração mais abundante é de cor branca, composta essencialmente por dolomita -  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  e em minoria calcita  $\text{CaCO}_3$ . Através da intrusão de um fluido granítico e aumento da temperatura algumas transformações ocorreram na mineralogia original geradas pelo desequilíbrio da fase carbonática com a fase silicática. A variedade esverdeada assumiu esta cor devido a uma série de reações que, buscando o equilíbrio físico-químico, formaram a serpentina (principal mineral responsável por esta coloração). Outros minerais também foram formados neste processo, como calcita, tremolita, talco e diopsídio. As variedades com cores avermelhadas, devem-se à presença de hematita distribuída em veios ou disseminada em domínios particulares dos mármore (HOERLLE, 2009).

Figura 04 - Mapa geológico simplificado da região de Caçapava do Sul.



Fonte: CPRM, 2010; adaptado por Schmidt *et al.*, 2016.

## 5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 5.1 Origem do Calcário e formação do Mármore

O calcário é uma rocha sedimentar originada de material precipitado por agentes químicos e orgânico formada por mais de 50% de minerais carbonáticos como a Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e Dolomita [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ], onde a deposição desses minerais se dá por precipitação química ou pelo acúmulo de agentes biogênicos. Além de também conter outros carbonatos como a Siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) e Magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ). (SAMPAIO E ALMEIDA, 2008).

Segundo Carvalho *et al.* (2007), os mármore derivam dos calcários por metamorfismo. A sujeição de rochas calcárias por efeitos de processos tectônicos, a condições de elevada pressão e temperatura que normalmente ocorrem a grandes profundidades no

interior da crosta terrestre, conduz a uma completa recristalização dos carbonatos, aparecimento de minerais de neoformação e obliteração das estruturas primitivas.

Assim, a formação do Mármore ocorre pela rocha de Calcário metamórficamente recristalizado, tendo como constituinte importante um carbonato, calcítico ou dolomítico, sendo eles neoformados.

## **5.2 Gênese dos solos carbonáticos**

Os solos desenvolvidos sobre material de natureza carbonática apresentam em comum, a elevada saturação por bases, havendo predomínio dos elementos Ca e Mg; argila de atividade alta e altos valores da relação Si/Al (SHINZATO, 1998). De acordo com Pinheiro Jr. (2018), os atributos condicionados por essa maior influência do material de origem favorecem a atuação de processos pedogenéticos específicos, destacando-se principalmente os de carbonatação ou calcificação e melanização.

O processo de carbonatação é caracterizado pela acumulação de  $\text{CaCO}_3$  no solo. Essa acumulação ocorre predominantemente em ambientes em que a dissolução e lixiviação dos carbonatos são incompletas, favorecendo que o  $\text{Ca}^{+2}$  solubilizado do material de origem reaja com o  $\text{CO}_3^{2-}$  e precipite na forma de calcita pedogênica; a intensificação da atuação desse processo pode levar a formação de um horizonte contínuo e cimentado, o horizonte petrocálcico (Fanning & Fanning, 1989; Kämpf & Curi, 2012).

## **5.3 Mineração de calcário e carvão mineral**

O Brasil é um dos maiores produtores de calcário no mundo sendo sua produção em torno de cem milhões de toneladas de calcário bruto e beneficiado, possuindo um crescimento de aproximadamente vinte por cento nos últimos cinco anos (DNPM, 2014).

Calcários são rochas a partir das quais pode-se obter inúmeros produtos de grande utilização no segmento industrial e suas múltiplas aplicações dependem de suas propriedades químicas e físicas. Além das aplicações nos processos industriais com tecnologias modernas, na indústria cerâmica, de tintas, de vidros, de papel e celulose, de borrachas, de cosméticos, de colas, de esmaltes, de eletrodos, de massas de paredes, de produtos químicos, de produtos farmacêuticos, de produtos de limpeza, de rações, de siderurgia, de tapetes e carpetes, de componentes poliméricos resistentes a altas temperaturas e tensões, no tratamento de água

para consumo humano e na fabricação de uma variedade de produtos, nos quais é utilizado como carga mineral de alta versatilidade (REBELO *et al.*, 2003).

A qualidade do calcário agrícola depende, principalmente, do teor, do tipo de elementos que diminuem a acidez e do tempo que leva para fazer efeito no solo. Esta qualidade depende da quantidade, que é medida por um índice conhecido como “Poder Relativo de Neutralização Total” – PRNT, que é obtido através do PN (Poder de Neutralização) multiplicado pela RE (Reatividade dada pela granulometria do calcário). O calcário moído e seus produtos, cal virgem e cal hidratada, escória, dentre outros, são aplicados no solo para corrigir a acidez e promover o crescimento das plantas. Recomendam-se a aplicação dos corretivos de solo alguns meses antes do plantio. Assim, a acidez do solo pode ser corrigida antes, permitindo o acesso, pelas plantas, aos nutrientes existentes nos solos (SILVA, 2009).

A taxa de aplicação do calcário no solo, ou seja, a calagem, varia de 6 a 7 toneladas por hectare, na abertura de novas áreas agrícolas, e de uma a três toneladas por hectare a cada dois a cinco anos, já que os benefícios da calagem se prolongam por alguns anos (BNDES, 1997).

Segundo Silva (2009), a maior parte das minas de calcário, em todo o mundo, são lavradas a céu aberto, principalmente por motivos de custos mais reduzidos, algumas utilizam a lavra subterrânea. Dentre todas as minas de calcário no Brasil, cujas informações são mantidas pelo DNPM, apenas uma (de porte médio) tem operações que não são exclusivamente a céu aberto, sendo classificada como uma mina mista, ou seja, com operações subterrâneas e a céu aberto.

As principais etapas da lavra de calcário a céu aberto incluem: remoção do capeamento, perfuração, desmonte por explosivos, e transporte até a usina de processamento. (SAMPAIO E ALMEIDA, 2009). Os depósitos de calcário podem ocorrer em grandes extensões e apresentar espessura de centenas de metros, portanto as minas de calcário podem ser operações de grande porte, e de longa vida útil. Muitas minas produzem diversos produtos, e o minério produzido que não atende às especificações para certos usos, ainda pode ser aproveitado para outros fins, usado como agregados para a construção civil, por exemplo. A tendência mundial continua sendo a abertura de minas cada vez maiores (BLISS, 2008).

Para sua obtenção, o calcário extraído precisa passar por um processo de calcinação, removendo o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que aparece combinado com os óxidos de cálcio ( $\text{CaO}$ ) ou magnésio ( $\text{MgO}$ ), em fornos que operam em temperaturas entre  $900^\circ$  e  $1200^\circ \text{C}$  (JOHN *et al.*, 2014).

Nas operações de lavra de calcário de Caçapava do Sul, normalmente é realizada uma seleção primária do calcário que deverá ser processado. Esta seleção é feita de modo qualitativo, por meio de identificação visual *in situ*, realizada por meio da observação da cor. As rochas que supostamente apresentam a qualidade ideal são as que possuem coloração branca ou de tons de cinza e rosado, dependendo do tipo e da quantidade de impurezas que apresentam. Este método nem sempre atinge o resultado esperado, pois depende de análises posteriores em laboratório que permite a verificação das componentes químicas e mineralógicas, indispensáveis para a obtenção de um produto de boa qualidade (LIMA, 2019).

Segundo Albergaria (2017), os minerais extraídos na região, essencialmente o calcário dolomítico, são destinados à produção de argamassa e cal, utilizadas em diversas áreas como na construção civil e na agricultura, essencialmente para correção de acidez dos solos.

Os estéreis e os rejeitos são os principais resíduos gerados pela mineração, merecendo atenção no que diz respeito a seu correto manuseio e destinação. Os estéreis compreendem os materiais escavados que não tem valor econômico agregado e ficam dispostos em pilhas e os rejeitos são resíduos resultantes dos processos de beneficiamento (SANTOS, 2016).

#### **5.4 Impactos ambientais da mineração**

De acordo com Sanches e Mechi (2010), praticamente, toda atividade de mineração implica supressão de vegetação ou impedimento de sua regeneração. Em muitas situações, o solo superficial de maior fertilidade é também removido, e os solos remanescentes ficam expostos aos processos erosivos que podem acarretar em assoreamento dos corpos d'água do entorno. A qualidade das águas dos rios e reservatórios da mesma bacia, a jusante do empreendimento, pode ser prejudicada em razão da turbidez provocada pelos sedimentos finos em suspensão, assim como pela poluição causada por substâncias lixiviadas e carreadas ou contidas nos efluentes das áreas de mineração, tais como óleos, graxa, metais pesados, estes últimos podem também atingir as águas subterrâneas.

Com frequência, a mineração provoca a poluição do ar por particulados suspensos pela atividade de lavra, beneficiamento e transporte, ou por gases emitidos da queima de combustível, outros impactos ao meio ambiente estão associados a ruídos, sobre pressão acústica e vibrações no solo associados à operação de equipamentos e explosões.

Em relação ao meio antrópico, a mineração pode causar não apenas o desconforto ambiental, mas também impactos à saúde causados pela poluição sonora, do ar, da água e do

solo, a desfiguração da paisagem é outro aspecto gerado pela mineração cujo impacto depende do volume de escavação e da visibilidade em razão de sua localização (MECHI & SANCHES, 2010).

No Brasil, as reservas de carvão estão localizadas no Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC) e Paraná (PR) e se caracterizam por grande quantidade de cinzas, de enxofre e ferro (Kalkreuth, 2006). De acordo com Weiler (2016), o processo de beneficiamento do carvão que dá origem aos rejeitos ocorre em etapas. Primeiramente é realizada uma preparação do carvão, com a cominuição e classificação granulométrica, facilitando a liberação dos compostos orgânicos de carvão mineral para a etapa seguinte de concentração. A concentração do carvão se dá principalmente devido a diferença de densidade entre os materiais que compõem o minério e é um dos principais pontos a serem considerados para a separação dos materiais.

Grandes áreas são ocupadas por um material potencialmente poluidor que poderia ser previamente processado para recuperação dos produtos contidos no rejeito, tais como carvão energético residual e concentrado de pirita para produção de ácido sulfúrico. A pirita, sulfeto de ferro com fórmula química  $FeS_2$ , é considerada a principal responsável pela geração da Drenagem Ácida de Minas (WEILER, 2016).

Segundo a Resolução CONAMA 001 de 1986 impacto ambiental é considerado: (...) qualquer alteração das propriedades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: I  $\pm$  a saúde e o bem estar da população; II  $\pm$  as atividades sociais e econômicas; III  $\pm$  a biota; IV  $\pm$  as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; V  $\pm$  a qualidade dos recursos ambientais.

A Tabela 01 mostra a relação dos aspectos e impactos ambientais referentes à atividade de disposição de estéril e sua hierarquização.

Tabela 01 – Impactos ambientais e medidas mitigadoras na mineração de calcário.

<b>Impactos</b>	<b>Medidas mitigadoras</b>	<b>Medidas compensatórias</b>
Alteração nos usos do solo	Programas de conscientização	Reflorestamento
Alteração da dinâmica hídrica superficial	Adequação das drenagens	Reflorestamento
Alteração da paisagem	Cortina vegetal; revegetação	-
Movimentos de massa	Revegetação, correção do ângulo de taludes, adequação das drenagens	-
Assoreamento	Bacias de sedimentação	-
Poluição visual	Cortina vegetal, revegetação	-
Contaminação da água superficial e subterrânea	Bacias de sedimentação	-
Contaminação do solo	Remediação, bacias de sedimentação	-
Ravinamento	Construção de leiras, revegetação	-
Poeiras	Umidificação das vias, revegetação de áreas de solo/estéril exposto; cortina vegetal	-
Ruídos	Uso de EPI, manutenção correta de equipamentos; cortina vegetal	-
Afastamento da fauna	Revegetação	-
Destruição da biocenose	Revegetação, estruturas para travessia de animais	-
Desmatamento	Minimização da supressão	Reflorestamento
Soterramento de vegetação	Minimização da supressão	Reflorestamento

Fonte: Adaptado de Santos, 2016.

### 5.5 Recuperação de áreas mineradas

A recuperação de áreas degradadas é um processo em constante aprimoramento que exige conhecimento, tecnologia e permanente monitoramento. Trata-se de criar condições para o restabelecimento de complexas redes de relações ecológicas entre solo, plantas,

animais e microclima, que permitam o reequilíbrio dinâmico da natureza em áreas hoje desprovidas dessas condições (REIS *et al.*, 1999).

Segundo Lopes (2016), a atividade de mineração é essencial para o desenvolvimento social e econômico, mas esta atividade altera o meio ambiente, provocando diversos tipos de degradações através dos impactos gerados na exploração do minério. Com isso, são elaborados os Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD's), que ajudam a identificar e caracterizar a área do empreendimento, identificando também os principais impactos e as medidas e técnicas que devem ser aplicadas para reduzi-los.

As atividades básicas no planejamento da recuperação geralmente incluem a definição dos objetivos, o estabelecimento do uso futuro da área e a elaboração de um plano de recuperação (WILLIANS *et al.*, 1990).

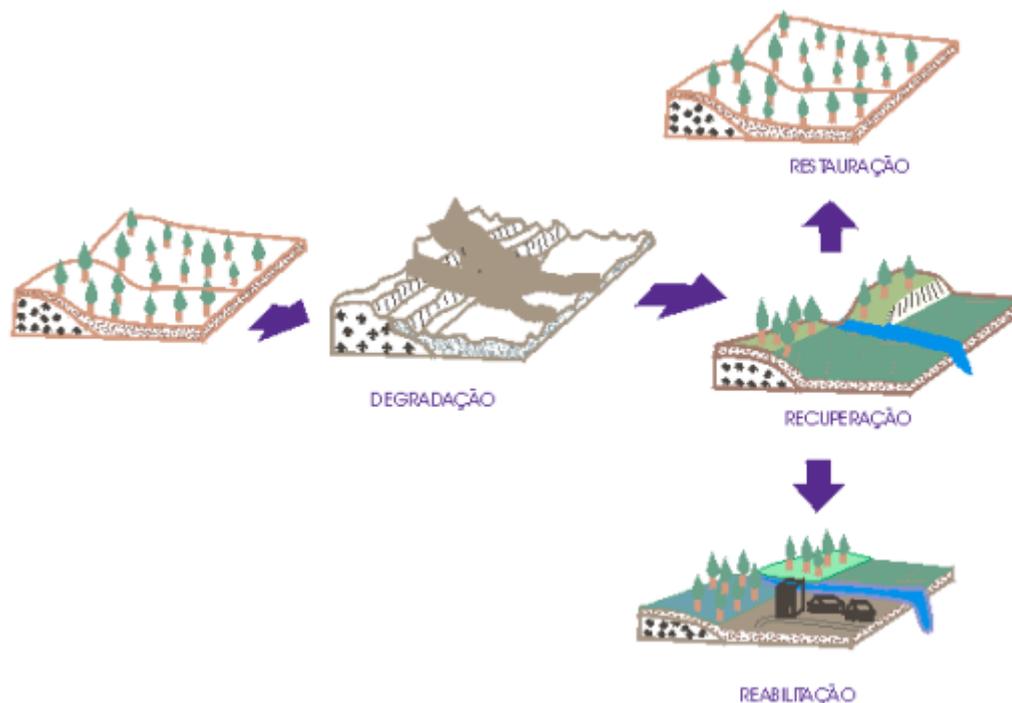
De acordo com os objetivos da recuperação, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) apresenta a seguinte classificação:

O conceito de restauração remete ao objetivo de reproduzir as condições originais exatas do local, tais como eram antes de serem alteradas pela intervenção (Figura 05). Um exemplo de restauração é o plantio misto de espécies nativas para regeneração da vegetação original (PIOLLI *et al.*, 2004).

O conceito de recuperação está associado à ideia de que o local alterado deverá ter qualidades próximas às anteriores, devolvendo o equilíbrio dos processos ambientais. Os Sistemas Agroflorestais regenerativos, que consistem em sistemas produtivos diversificados e com estrutura semelhante à vegetação original (PIOLLI *et al.*, 2004).

A reabilitação é um recurso utilizado quando a melhor solução for o desenvolvimento de uma atividade alternativa adequada ao uso humano e não aquela de reconstituir a vegetação original, mas desde que seja planejada de modo a não causar impactos negativos no ambiente (SABESP, 2003).

Figura 05 – Variantes da recuperação ambiental em áreas degradadas.



Fonte: Bitar *et al.*, 1995, modificado por Freitas, 2019.

## 5.6 Tecnosolos

Geralmente, os solos urbanos e ou gerados por atividades de mineração são classificados como Tecnosolos, onde estes devem conter 20% ou mais de materiais tecnogênicos nos primeiros 100 cm da superfície do solo ou a rocha contínua ou uma camada cimentada (LOPES, 2020).

Os Tecnosolos em geral são elaborados para um propósito específico como é o caso daqueles construídos a partir de resíduos utilizados na recuperação de áreas degradadas como substrato para o crescimento de plantas (ASENSIO ET AL., 2013; LOPES, 2020). Eles devem ser capazes de fornecer e ciclar nutrientes para as plantas e biota do solo, amortecer ou filtrar possíveis contaminantes, reter e fornecer água para as plantas e trocar gases com a atmosfera (Camps Arbostain et al., 2008; Van Deventer et al., 2008; Daniels e Zíper, 2010). O comportamento e a qualidade dos solos dependem de um ajuste fino entre físico, químico e bioaspectos lógicos para facilitar não só o crescimento das plantas, mas também restaurar funções e serviços do ecossistema (SPOSITO, 2008; LAL, 2015). Por isso, interações entre diferentes materiais e plantas devem ser abordadas para produzir um Tecnosolo adequado para o crescimento das plantas.

O uso de Tecnossolos poderia substituir a necessidade dos solos de áreas de empréstimo utilizado na recuperação de áreas degradadas, evitando a necessidade de aquisição, processos de licenciamento ambiental, e degradação de novas áreas por parte das mineradoras. Os solos são utilizados para reconformação topográfica e formação de uma camada de solo fértil, necessário à revegetação do local degradado (SINGH, 2002; SHEORAN *et al.*, 2010).

De acordo com Weiler *et al.*, (2019), alguns impactos ambientais estão associados à mineração, incluindo o desmatamento, a degradação do solo e o acúmulo de grandes quantidades de rejeitos em superfície. Desta forma, uma importante medida dentro da mineração de carvão é condicionar os rejeitos para que a disposição em superfície se torne menos danosa ao meio ambiente.

Com o aporte de aditivos, priorizando o uso de outros resíduos para correção da acidez e incorporação de matéria orgânica, os rejeitos podem ser convertidos em um Tecnossolo, capaz de sustentar o crescimento de plantas e atividade microbiana. A recuperação de áreas degradadas com solos fabricados com resíduos é uma possibilidade em substituição à atual sistemática de recobrimento dos rejeitos com solo oriundo de jazidas de empréstimo, reduzindo o impacto ambiental como um todo.

## 6 MATERIAIS E MÉTODOS

Considerando que o objetivo deste trabalho é fabricar solo para crescimento vegetal a partir de rejeito de calcário/mármore como matriz mineral, adicionando-lhe fonte de acidez e material orgânico, empregou-se um experimento para analisar os atributos físicos, avaliação do solo em termos de fertilidade e capacidade dos Tecnossolos de sustentar a vegetação.

Os materiais utilizados foram:

- Rejeito de calcário;
  - Matriz mineral
- Solo controle;
  - Solo da área de empréstimo.
- Fonte de matéria orgânica;
  - Húmus de minhoca.
- Rejeito piritoso;
  - Fonte de acidez.

- Sementes;
  - Sementes de gramínea forrageira (*Aveia Preta – Avena strigosa*) e Azevém (*Lolium multiflorum Lam*).

### 6.1 Coleta e preparação das amostras

A amostra de rejeito de calcário utilizada neste estudo foi fornecida pela Dagoberto Barcellos S/A de Caçapava do Sul/RS. A empresa pioneira na cidade, na produção de calcário para construção e calcário agrícola. A amostra inicial (10 kg) foi homogeneizada e quarteada conforme a NBR 10007 (ABNT, 2004). A amostra de concentrado pirítico utilizada neste estudo foi fornecida por uma empresa de mineração de carvão Metropolitana do estado de Santa Catarina.

As amostras iniciais de rejeito de calcário (25 kg) e de rejeito pirítico (6 kg) foram homogeneizadas e quarteadas conforme a NBR 10007 (ABNT, 2004). Em um almofariz e pistilo, moeu-se 168g da amostra inicial de rejeito de calcário, até obter a granulometria fina o bastante para passar na peneira de 0.149 mm (Figura 06), para utilizar na determinação do Potencial de Neutralização.

Para amostra de rejeito pirítico, foi realizada a britagem em britador de mandíbulas para obtenção de 6 kg do material com granulometria entre 2 e 6 mm (Figura 07). A preparação das amostras foi realizada no Laboratório de lavra, planejamento e tratamento de minérios (LATRAM) da UNIPAMPA.

Figura 06 - Preparação da amostra de rejeito de calcário, com quarteador e almofariz e pistilo e moagem do material.



Fonte: Autora.

Figura 07 - Preparação da amostra de concentrado pirítico, com a britagem e moagem do material.

	
<p>Concentrado pirítico de rejeitos de carvão mineral</p>	<p>Britagem em britador de mandíbulas</p>
	
<p>Moagem em moinho orbital</p>	<p>Amostra com granulometria &lt; 0,15 mm</p>

Fonte: Autora.

## 6.2 Balanço Ácido-base

O balanço ácido base (ABA) tem por objetivo determinar o balanço entre a produção e o consumo de acidez pelos componentes minerais de uma amostra, foi realizado no laboratório de solos e meio ambiente (LASOMA) da UNIPAMPA. O método utilizado neste trabalho foi o proposto por Sobek et al. (1978), no qual se determina o potencial de produção de acidez (AP) e o potencial de neutralização (NP). A determinação do potencial de acidez (AP) pelo método ABA é realizada a partir da análise de enxofre total, e pelo MABA a partir do enxofre pirítico. O procedimento do potencial de neutralização (NP) é feito a partir da digestão ácida (HCl) da amostra para consumir os minerais neutralizantes.

A partir da determinação do potencial de acidez (AP) e do potencial de neutralização (NP), calcula-se o potencial de neutralização líquido (NNP) pela diferença ( $NNP = NP - AP$ ). Esse balanço foi realizado para obter as proporções necessárias da matriz mineral (rejeito de calcário) e da fonte de acidez (rejeito pirítico).

Fonte de matéria orgânica: deve ser adicionada para obter uma mistura final com 3% de matéria orgânica. Para isso, será analisado o teor de carbono orgânico presente na amostra de esterco a partir da análise proposta por Walkley and Black (1974) e calculado a massa necessária para ser incorporada ao rejeito de calcário e rejeito pirítico.

Os reagentes utilizados foram:

- HCl 0,5 M

- NaOH 0,5 M

Foram pesados aproximadamente 0,5 g de amostra moída de rejeito de calcário em um béquer, adicionou-se na amostra 2 gotas de HCl, para avaliar a presença de carbonato. A presença de  $\text{CaCO}_3$  é indicada por uma reação de borbulhamento, se essa reação for forte é aconselhável usar 80 mL de HCl no ABA.

O experimento foi feito por triplicatas, pesou-se 2,0006 g, 2,0008 g e 2,0010 g, em 3 Erlenmeyer de 250 mL. Adicionou-se 80 mL de HCl, nos frascos contendo as amostras. Após foi aquecido os frascos em três agitadores magnéticos com aquecimento, por aproximadamente uma hora, quando não há liberação de gás visível.

Utilizaram-se filtros de papel nos béqueres, para filtrar os sólidos. Foi adicionado água destilada ao filtrado até um volume total de 125 mL, então ferveu-se por 1 minuto e esfriou-se em temperatura ambiente.

O último passo foi a titulação com 0,5 NaOH, até pH 7, mostrando o ponto de virada (Figura 08). A concentração de NaOH usada na titulação corresponde à concentração de HCl usada anteriormente.

O potencial de geração de acidez foi realizado pelo método de contabilização de ácidos e bases tradicionais e modificados descritos em Sobek et al (1978) e EPA (1994). A determinação do potencial de acidez (AP) pelo método ABA tradicional foi realizada a partir da análise de enxofre total e pelo método ABA modificado foi realizada pela análise de enxofre pirítico, via úmida. O AP é calculado de acordo com a Eq 26 (um mol de  $\text{CaCO}_3$  é requerido por mol de S).

$$\text{AP (kg CaCO}_3\text{/t)} = (1000/32).\%S$$

A determinação do potencial de neutralização (NP) pelo método ABA tradicional foi realizada pelo ataque da amostra com ácido clorídrico aquecido a  $90^\circ\text{C}$ , por 1 hora, para consumir os minerais neutralizantes, seguido de titulação com NaOH até pH 7,0. A medida do NP pelo método ABA modificado foi realizada pelo ataque da amostra com ácido clorídrico, a temperatura ambiente, por 24 horas, seguido de titulação com NaOH até pH 8,3. O cálculo do NP foi realizado pelas equações apresentadas a seguir (Eq. 1, 2 e 3).

$$C = \frac{\text{mL NaOH}}{\text{mL HCl}} \quad (1)$$

$$\text{Eq. ácido consumido} = (\text{mL ácido adicionado}) - (\text{mL base adicionado}).C \quad (2)$$

$$\text{NP} = (\text{Eq ácido cons}).25.(N \text{ ácido}) \quad (3)$$

Onde: C = constante; N = normalidade

Os resultados obtidos no teste ABA podem ser visualizados na Tabela 02. Pode-se verificar o alto potencial de geração de acidez do rejeito pirítico ( $\text{NNP} = -1087 \text{ kg CaCO}_3\text{/ton}$ ) e alto potencial de neutralização do rejeito de calcário ( $\text{NNP} = 899.53 \text{ kg CaCO}_3\text{/ton}$ ). A partir desses resultados, foi prevista a proporção dos materiais visando uma mistura com pH próximo a neutralidade, e isso seria obtido com a proporção de rejeito pirítico para rejeito de calcário na ordem de 1:1,2.

Tabela 02 - Resultado do teste de balanço ácido base para os rejeitos de pirita e calcário

	Rejeito pirítico (RP)	Rejeito calcário (RC)	
NP (kg CaCO <sub>3</sub> /ton)	31,1	899.53	
AP (kg CaCO <sub>3</sub> /ton)	1118,1	0	
NNP (kgCaCO <sub>3</sub> /ton)	-1087,0	899.53	
			Proporção para neutralidade RP/RC = 1:1,2

Fonte: Autora.

Figura 08 – Titulação feita pelo método ABA mostrando pH próximo a 7, marcando o ponto de virada.



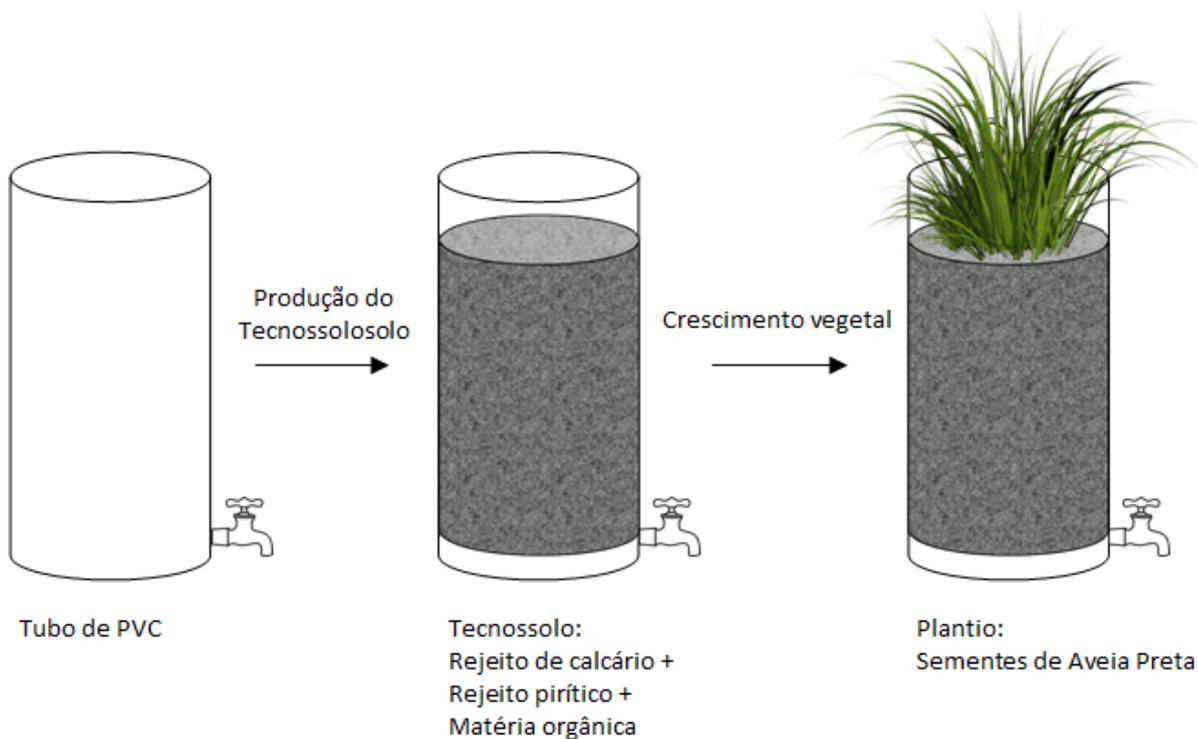
Fonte: Autora.

## 6.3 Tecnossolos

### 6.3.1 Montagem dos vasos para crescimento vegetal

Foram feitos 12 vasos para crescimento vegetal, a partir de tubos de PVC (Figura 09) com dimensões de 10 cm de diâmetro e 25 cm de altura. Os tubos receberam camada de tela plástica em sua base e filtro de papel quantitativo para evitar perda do material durante a estabilização do substrato. Onde foram feitos 4 experimentos em triplicata, denominou-se rejeitos sendo rejeito de calcário, rejeito pirítico e matéria orgânica de 100% de rejeitos, 75% rejeitos e 25% de solos, 50% de rejeitos e 50% de solos, por último solo controle, 0% de rejeitos 100% solo. O solo foi coletado na UNIPAMPA, onde foram secados e peneirados. Foram plantadas 10 sementes em cada experimento, sendo 5 sementes de Aveia Preta e 5 de Azevém.

Figura 09 – Esquema da montagem dos Tecnossolos nos tubos de PVC.



Fonte: Autora.

### 6.3.2 Caracterização dos materiais selecionados

O tecido vegetal foi cortado rente à raiz, dando fim ao experimento após 56 dias de plantio. Também foram retirados os solos presentes nos experimentos, que então foram secos por 1 dia na luz solar e na estufa por 60°C, durante 2 dias. As amostras foram despejadas em quatro recipientes separados, representando as amostras de 100%, 75%, 50% e 0% de rejeitos (Figura 10). As triplicatas foram misturadas separadamente para análise vegetal de parâmetros químicos e físicos. E para os Tecnosolos foram feitas as granulométricas, análise elementar, química básica e umidade.

Figura 10 - Experimentos desmontados e colocados para secar a luz do sol.



Fonte: Autora.

### 6.3.3 Granulometria e classificação textural dos Tecnosolos

Após a secagem das amostras, a caracterização granulométrica feita dos Tecnosolos, realizou-se no LASOMA - laboratório de solos e meio ambiente da UNIPAMPA, e seguiu-se a série de peneiras 2,00 mm; 1,00 mm; 0,3 mm; 0,212 mm; 0,150 mm; 0,075 mm e 0,053 mm.

Para a classificação textural, utilizou-se a escala modificada e alargada, em 1922, por Chester K. Wentworth, sendo conhecida pela designação de escala de Udden Wentworth. Utilizando aberturas de 2 e 1 mm como ponto de referência, os limites das classes granulométricas utilizadas são no sentido decrescente (Tabela 03).

Tabela 03 - Tabela granulométrica (referência).

<b>mm</b>	<b>Classe de tamanho</b>
<256	Matacão
64 - 256	Bloco
4 - 64	Seixo
2 - 4	Grânulo
1 - 2	Areia muito grossa
0,5 - 1	Areia grossa
0,25 - 0,5	Areia média
0,125 - 0,25	Areia fina
0,0625 - 0,125	Areia muito fina
0,0039 - 0,0625	Silte
>0,0039	Argila

Fonte: Modificada de Wentworth, 1922.

### 6.3.4 Teor de umidade do Tecno solos

O cálculo da umidade (U) de um solo, foi feito pelo método estufa, onde a razão entre a massa da água (Ma) contida em um volume de solo e a massa da parte sólida seca (Ms) existente nesse mesmo volume (CAPUTO, 2017).

$$U (\%) = (Ma - Ms)/Ma . 100$$

### 6.3.5 Análise elementar dos Tecno solos

A determinação dos elementos químicos presentes nas amostras (tais como: Alumínio, Magnésio, Silício, Cálcio, Ferro, Potássio e Fósforo) foram determinados por análise de Fluorescência de Raios-X (FRX) Brucker, este equipamento é qualitativo e semiquantitativo, ele registra os elementos presentes na amostra (a partir do magnésio, Z=12) e o valor aproximado destes elementos. Foram feitas três leituras, destas leituras foram feitas a sua média, essa análise foi feita no Laboratório de lavra, planejamento e tratamento de minérios (LATRAM) da UNIPAMPA.

### **6.3.6 Análise química básica dos Tecnosolos**

A análise química básica dos Tecnosolos ou análise de fertilidade, foi realizada no laboratório de análise de solos (LAS) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Nessas análises incluem-se: Diagnóstico para acidez do solo, calagem, macronutrientes, recomendação de adubação NPK-S e relações molares. Para classificação foi utilizado o manual de adubação e calagem da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul. Assim, para esses nutrientes foram estabelecidas cinco faixas de interpretação agrônômica dos resultados de análises de solo, três delas entre os valores zero e o teor crítico, pela divisão em intervalos uniformes, denominadas "Muito baixo", "Baixo" e "Médio" e duas para os valores superiores ao valor de teor crítico, denominadas "Alto" e "Muito alto".

### **6.4 Análises de crescimento vegetal, parâmetros químicos e físicos**

Para analisar o crescimento vegetal, foram feitas a taxa de germinação de cada experimento, para parâmetros químicos usou-se o FRX, para os parâmetros físicos, como massa vegetal, secou-se as amostras por um dia na estufa em temperatura de 60°C, pesou-se e foi feito o cálculo da média de cada amostra. Essas análises foram feitas no LATRAM e LASOMA da UNIPAMPA.

## **7 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **7.1 Tecnosolos**

Na tabela 04 a seguir mostram as quantidades em gramas dos materiais utilizados para a montagem dos experimentos para os quatro tratamentos, em triplicata, com massa total por vaso de 2,180 kg. Por ordem de segurança, optou-se pela proporção 1:1,25 de rejeito pirítico para rejeito de calcário (embora, como mostrado na Tabela 02, a proporção exata fosse de 1:1,2). A massa de matéria orgânica foi adicionada a fim de se obter 5% de matéria orgânica na mistura final dos vasos contendo rejeito; considerando que o húmus utilizado tem aproximadamente 50% de M.O., a massa adicionada foi de 200g.

Tabela 04 – Quantidades da massa em gramas utilizados para o experimento.

Número do experimento	Solo (g)	Rejeito Pirítico (g)	Rejeito de Calcário (g)	Matéria orgânica (g)	Porcentagem total de rejeitos (%)
1	0	880	1100	200	100
2	0	880	1100	200	100
3	0	880	1100	200	100
4	545	638	797	200	75
5	545	638	797	200	75
6	545	638	797	200	75
7	1090	395	495	200	50
8	1090	395	495	200	50
9	1090	395	495	200	50
10	2180	0	0	0	0
11	2180	0	0	0	0
12	2180	0	0	0	0
<b>Somatório</b>	<b>4905</b>	<b>5739</b>	<b>7176</b>	<b>1800</b>	<b>0</b>

Fonte: Autora.

Os experimentos foram montados e colocados na frente do prédio dos laboratórios de química (Figura 11), onde durante o dia reflete a luz solar.

Figura 11 – Os 12 experimentos montados e colocados ao ar livre.



Fonte: Autora.

### 7.1.1 Granulometria dos Tecnosolos

A caracterização granulométrica e classe textural dos tratamentos são apresentados na Tabela 05.

Tabela 05 - Caracterização granulométrica das amostras de Tecnosolos.

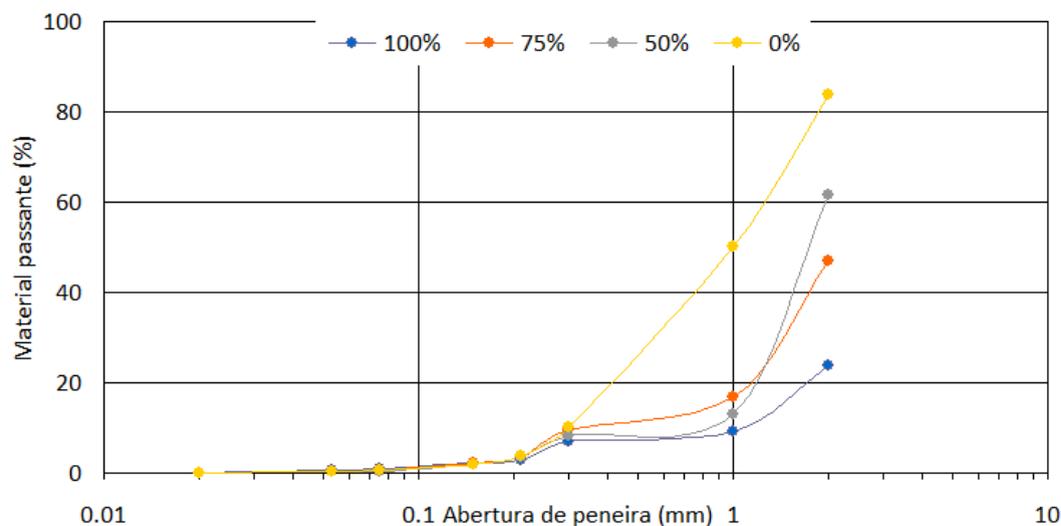
<b>Abertura (mm)</b>	<b>100% (g)</b>	<b>75% (g)</b>	<b>50% (g)</b>	<b>0% (g)</b>	<b>Classe textural</b>
2	4022	2951	2036	885	Grânulo
1	771	1685	2585	1826	Areia muito grossa
0,3	119	412	260	2160	Areia grossa
0,212	212	343	258	345	Areia média
0,15	37	74	84	98	Areia fina
0,075	72	85	77	84	Areia muito fina
0,053	19	13	13	16	Silte/Argila
<0,053	27	19	10	10	Silte/Argila
Total	5279	5582	5333	5424	-

Fonte: Autora

Os resultados apresentados acima, mostram que o peso retido (g) nas amostras de 100% e 75% de rejeitos, há maior quantia em peso retido nas aberturas maiores, onde há uma maior predominância de grânulos. Nas amostras de 50% e 0% de rejeitos a predominância é de areia muito grossa.

No gráfico presente na Figura 12, mostra o material passante em cada abertura das peneiras utilizadas. No qual, o experimento de 100% de rejeitos, os sedimentos passam cerca de 20% da peneira de 2 mm, pois são os materiais mais grossos. O experimento de 75% e 50% de rejeitos, demonstram comportamentos similares, sendo que os seus sedimentos do experimento de 75%, passam pouco mais de 40% do seus grãos da peneira com abertura de 2 mm, porém retém mais na peneira com abertura de 1 mm. E no experimento de 50% de rejeitos, 60% dos seus sedimentos passam da peneira com abertura de 2 mm, e também retém mais na peneira com abertura de 1 mm. No caso do solo controle (0%), 80% dos seus sedimentos passam da abertura da peneira de 2 mm, quase 50% dos sedimentos também passam da peneira de 1 mm, sendo sua maior concentração de sedimentos na peneira de abertura de 0,3 mm.

Figura 12 - Gráfico de dispersão do material passante em cada abertura (mm) das peneiras.



Fonte: Autora.

### 7.1.2 Teor de umidade

Após a secagem dos Tecnosolos, calculou-se o teor de umidade presente em cada experimento, conforme a Tabela 06 mostra.

Tabela 06 - Apresenta o teor de umidade presente em cada amostra.

Porcentagem de rejeitos (%)	Solo <i>in situ</i> - Ma (g)	Solo seco - Ms (g)	Teor de umidade (%)
100	6,172	6,006	2,689
75	7,077	5,999	15,232
50	6,624	5,769	12,907
0	6,585	6,036	8,876

Fonte: Autora.

Nota-se que o teor de umidade é menor retido na amostra de 100% de rejeitos, provavelmente devido a granulometria mais grossa do mesmo, que dificulta a retenção de água. Já nos experimentos de 75% e 50% de rejeitos são os que fornecem melhores resultados, onde o teor de umidade é maior quando comparado ao solo controle (0%).

### 7.1.3 Análise elementar dos Tecnosolos

A análise elementar do Tecnossolos mostra os elementos químicos lidos no FRX (Tabela 07), devido os rejeitos utilizados (Calcário e Pirítico), os experimentos com maior porcentagem de rejeitos (100% e 75%) apresenta maiores teores de magnésio (Mg), cálcio (Ca), ferro (Fe), enxofre (S). O fósforo (P) apresenta teor significativo apenas no experimento de 100% de rejeitos. Porém, os experimentos de menor porcentagem de rejeitos (50% e solo controle 0%), possuem maiores teores de silício (Si), alumínio (Al) e potássio (K).

Tabela 07 - Mostra a porcentagem dos elementos químicos presente no Tecnossolos.

<b>Porcentagem de rejeitos (%)</b>	<b>Magnésio (%Mg)</b>	<b>Silício (%Si)</b>	<b>Cálcio (%Ca)</b>	<b>Alumínio (%Al)</b>	<b>Ferro (%Fe)</b>	<b>Enxofre (%S)</b>	<b>Potássio (%K)</b>	<b>Fósforo (%P)</b>
100	16,83	13,73	17,9	4,94	7,85	9,05	0,6	1,79
75	5,78	29,53	11,7	5,92	4,09	4,13	0,9	0,68
50	4,19	44,43	3,23	7,72	2,02	1,41	1,47	0,17
0	4,01	54,83	0,32	9,07	1,21	0,05	1,56	0

Fonte: Autora.

RUIZ *et al.*, 2020, apresenta valores de elementos químicos que foram adequados ao solo produzido. Os dados apresentados mostraram que a fertilidade dos Tecnossolos foi equivalente ou até superior à dos solos naturais. Os valores de pH do Tecnossolo estavam próximos da neutralidade e o cálcio (Ca), magnésio (Mg) e fósforo (P) eram maiores para os solos construídos do que para os solos naturais. Ainda, segundo Ruiz *et al* (2020), a empresa que produziu os Tecnossolos, decidiu fazer o procedimento que consistiu em despejar os rejeitos de volta às cavas e revegetá-las. A mineradora ao longo das últimas décadas construiu três tipos de Tecnossolos, onde atualmente estão sendo cultivadas cana-de-açúcar, há quatro e oito anos, e pastagem há mais de 20 anos.

#### 7.1.4 Análise química básica

Os resultados da análise química básica estão representados abaixo por tabelas. Para a obtenção do pH neutro ou próximo a neutralidade, misturou-se rejeitos ácido (pirítico) e básicos (calcário), os resultados (Tabela 08) apontam que a proporção das misturas de rejeitos foram adequadas.

Tabela 08 - Escala pH para todos os experimentos.

<b>Porcentagem de rejeitos (%)</b>	<b>pH água 1:1</b>
100	6
75	6,3
50	6,5
0	6,1

Fonte: Laboratório de solos (LAS) da UFSM.

De acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul (2004), o pH referência é o valor do pH do solo mais adequado ao desenvolvimento das culturas, a faixa ideal de pH para as plantas gira em torno de 6 a 6,5. Então o pH nos experimentos estão adequados para o plantio.

Nos experimentos de maior porcentagem de rejeitos (100% e 75%), o teor de cálcio (Ca) está muito alto quando comparado aos experimentos de menor porcentagem de rejeitos (50% e 0%), o magnésio (Mg) demonstra o mesmo comportamento (Tabela 09). Observa-se que a acidez potencial do solo (H+Al) diminui à medida que o índice SMP aumenta. Os resultados da saturação de bases foram altos devido a grande quantidade de cálcio (Ca) proveniente dos rejeitos.

Tabela 09 - Diagnóstico para acidez do solo e calagem dos experimentos

<b>Porcentagem de rejeitos (%)</b>	<b>Ca (cmol<sub>c</sub>dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Mg (cmol<sub>c</sub>dm<sup>3</sup>)</b>	<b>H+Al (cmol<sub>c</sub>dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Saturação Bases (%)</b>	<b>Índice SMP</b>
100	77,8	8,7	2,5	97,2	6,5
75	67,4	4,2	1,6	97,8	6,9
50	19,6	3	1,6	93,5	6,9
0	7,4	2,7	3,1	76,8	6,3

Fonte: Laboratório de solos (LAS) da UFSM.

O teor de matéria orgânica do solo é utilizado como indicador da disponibilidade de nitrogênio, nos experimentos de maior porcentagem de rejeitos (100% e 75%) nota-se que o teor de matéria orgânica é alto, e nos experimentos de menor porcentagem (50% e 0%) seu teor é médio. O fósforo (P), também nos experimentos de maior porcentagem de rejeitos, mostra-se com teor muito alto, sendo que o excesso de fósforo (P) causa uma redução na expansão das folhas.

O teor de potássio nos experimentos de 100% e 75% de rejeitos seu teor é médio, no experimento de 50% de rejeitos e no solo controle (0%) é alto. O teor de potássio está dentro dos padrões de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul (2004).

A capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC pH7) é alta no experimento de 100% de rejeitos, ou seja, ele pode reter a maior quantidade de cátions. No experimento de 75% de rejeitos ele é médio, e nos experimentos de 50% e 0% de rejeitos mostram-se valores baixos (Tabela 10).

Tabela 10 - Diagnóstico para macronutrientes e recomendação de adubação NPK-S dos experimentos

<b>Porcentagem de rejeitos (%)</b>	<b>M.O. (%)</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>P Mehlich</b>	<b>K (cmol<sub>c</sub>dm<sup>3</sup>)</b>	<b>CTC pH7 (cmol<sub>c</sub>dm<sup>3</sup>)</b>
100	12,6	8	50,8	0,235	13,6
75	7,2	6	39,8	0,246	24,5
50	4,8	8	69,8	0,307	73,4
0	4,1	14	16	0,286	89,3

Fonte: Laboratório de solos (LAS) da UFSM.

E a relação Ca/Mg também está muito alta, sendo muito mais cálcio do que magnésio (Tabela 11). Os cátions de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e o potássio (K), são importantes no desenvolvimento da nutrição das plantas e a interação entre eles é essencial, em termos de favorecer ou inibir a absorção pelas plantas. O cálcio em excesso inibe a absorção de magnésio. Quando a relação Ca/Mg está alta, é possível regular aplicando um calcário com alto teor de magnésio ou uma fonte de magnésio (Souza *et al.*, 2004).

Tabela 11 - Diagnóstico para micronutrientes e relações molares.

Porcentagem de rejeitos (%)	Relações Molares		
	Ca/Mg	(Ca+Mg)/K	K/(Ca+Mg) <sup>1/2</sup>
100	8,9	368,3	0,025
75	16	290,9	0,029
50	6,6	73,6	0,065
0	2,7	35,5	0,09

Fonte: Laboratório de solos (LAS) da UFSM

## 7.2 Análises de crescimento vegetal, parâmetros químicos e físicos

Taxa de germinação: Conforme a Tabela 12, demonstra o resultado da taxa de germinação mostra que em todos os experimentos, inclusive nos de 100% rejeitos, as sementes germinaram em boa quantidade.

Tabela 12 – Apresenta o resultado da taxa de germinação.

Número do experimento	Porcentagem de rejeitos (%)	Taxa de germinação (10/10)
1	100	6/10
2	100	7/10
3	100	10/10
4	75	7/10
5	75	8/10
6	75	8/10
7	50	7/10
8	50	10/10
9	50	6/10
10	0	5/10
11	0	7/10
12	0	10/10

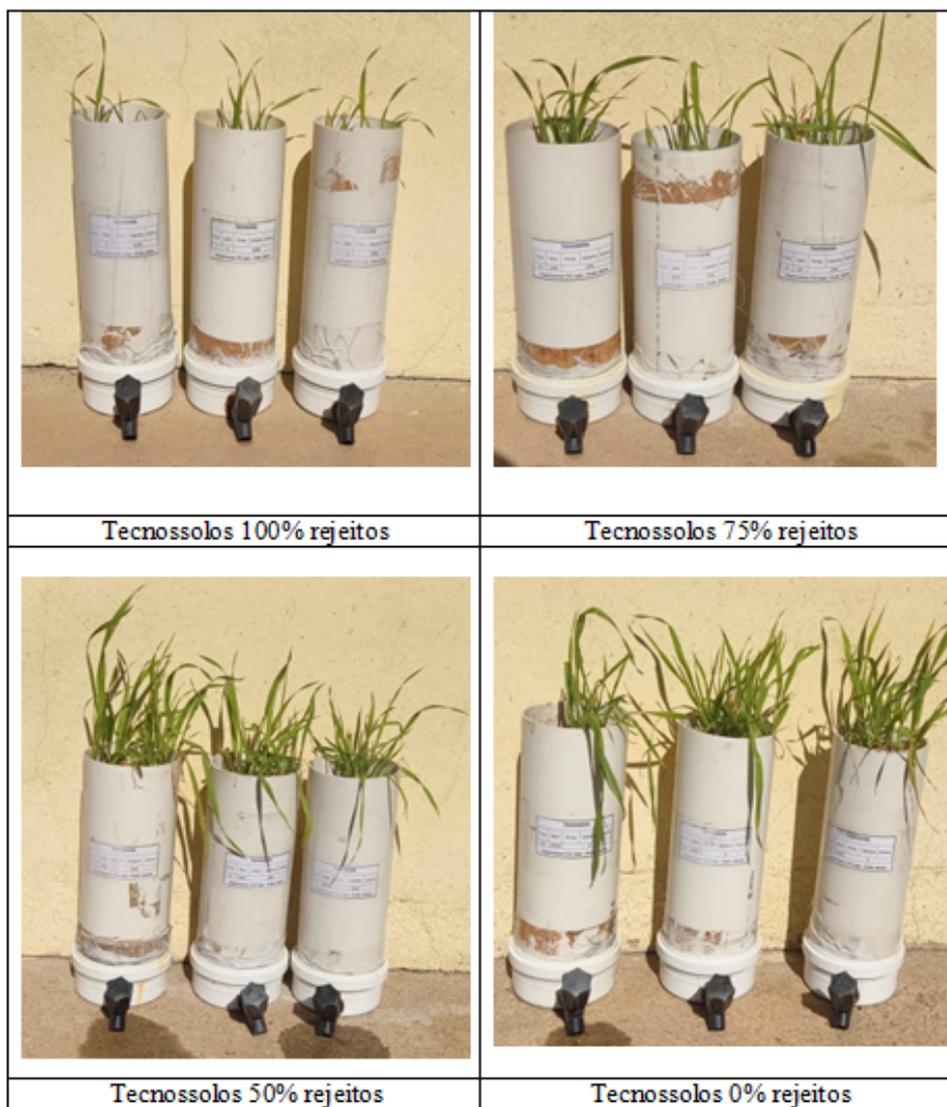
Fonte: Autora.

### 7.2.1 Análises de crescimento vegetal

Após 56 dias das sementes plantadas nos vasos dos experimentos em triplicatas, conforme a ordem acima da tabela. A massa vegetal nos experimentos de 100% e 75% de rejeitos apresentam baixo volume e pouco desenvolvimento das folhas, o experimento de 50%

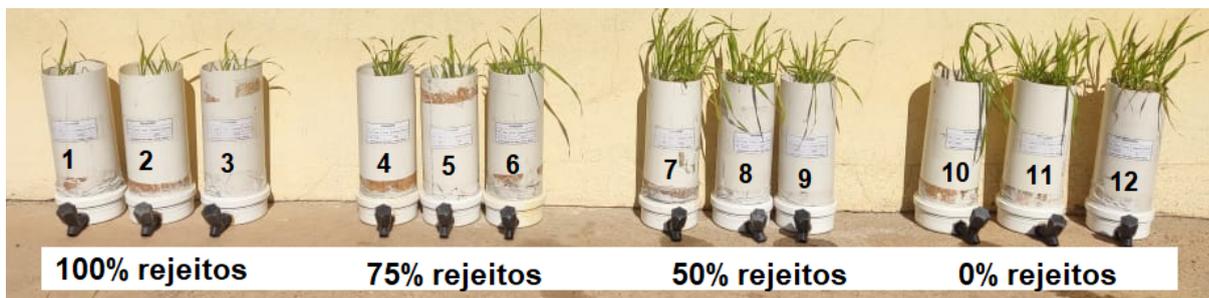
de rejeitos e o solo controle, possuem alto volume e bom desenvolvimento das folhas, (Figura 13 e 14).

Figura 13 - apresentando o crescimento vegetal referente aos 56 dias após o plantio das sementes.



Fonte: Autora.

Figura 14 - Mostrando os 12 experimentos seguindo a ordem de porcentagem de rejeitos.



Fonte: Autora.

### 7.2.2 Parâmetros físicos

Os resultados da tabela 13, mostram a quantidade de massa vegetal de cada porcentagem de rejeitos.

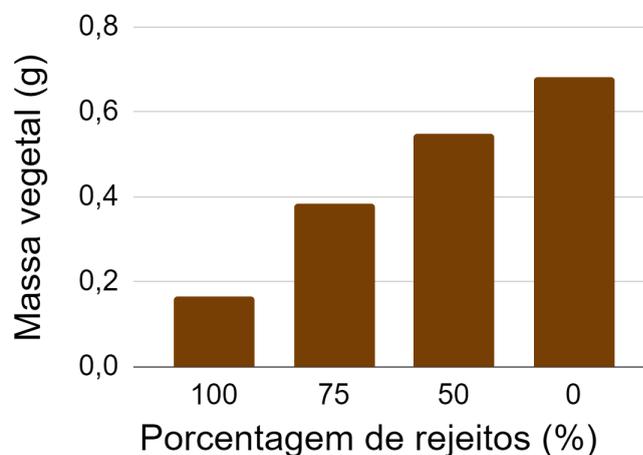
Tabela 13 - Apresenta resultado da massa vegetal (g).

Porcentagem de rejeitos (%)	Massa vegetal (g)
100	0,163
75	0,382
50	0,545
0	0,679

Fonte: Autora.

O gráfico abaixo (Figura 15), mostra a grande diferença observada no experimento, em relação direta da massa seca produzida em relação a quantidade de rejeitos no Tecnosolos, provavelmente devido a granulometria mais grossa dos rejeitos, dificulta a retenção de água e maior teor de cálcio e relação Ca/Mg presente nos experimentos de maior porcentagem de rejeitos (discutido anteriormente no item 7.1.4).

Figura 15 - Gráfico apresentando a diferença observada no experimento em relação a sua massa vegetal seca (g).



Fonte: Autora.

### 7.2.3 Análise elementar da vegetação

A análise elementar da vegetação, mostra os elementos químicos lidos no FRX (Tabela 14). Onde, os experimentos com maior porcentagem de rejeitos (100%) apresentaram um aumento significativo no teor de potássio (K) em comparação ao solo controle (0%). Em comparação do solo controle (0%) e aos outros experimentos onde aumenta a porcentagem de rejeitos, também há um aumento dos elementos como cálcio (Ca), ferro (Fe), enxofre (S), alumínio (Al) e potássio (K), exceto o magnésio, onde ocorre a diminuição do teor conforme o aumento de porcentagem de rejeitos. Levando em consideração que o FRX é qualitativo, ou seja, ele identifica os elementos presentes mas pode ter erro em relação aos teores dos mesmos.

Tabela 14 - Mostra a porcentagem dos elementos químicos presentes no tecido vegetal.

Porcentagem de rejeitos (%)	Magnésio (%Mg)	Silício (%Si)	Cálcio (%Ca)	Alumínio (%Al)	Ferro (%Fe)	Enxofre (%S)	Potássio (%K)	Fósforo (%P)
100	4,13	1,72	1,87	2,33	0,27	0,55	7,12	0,47
75	4,27	3,59	0,98	1,43	0,13	0,5	3,14	0,31
50	6,38	0,99	0,61	1,24	0,12	0,37	3,07	0,24
0	6,31	0,89	0,47	1,16	0,04	0,12	2,65	0,17

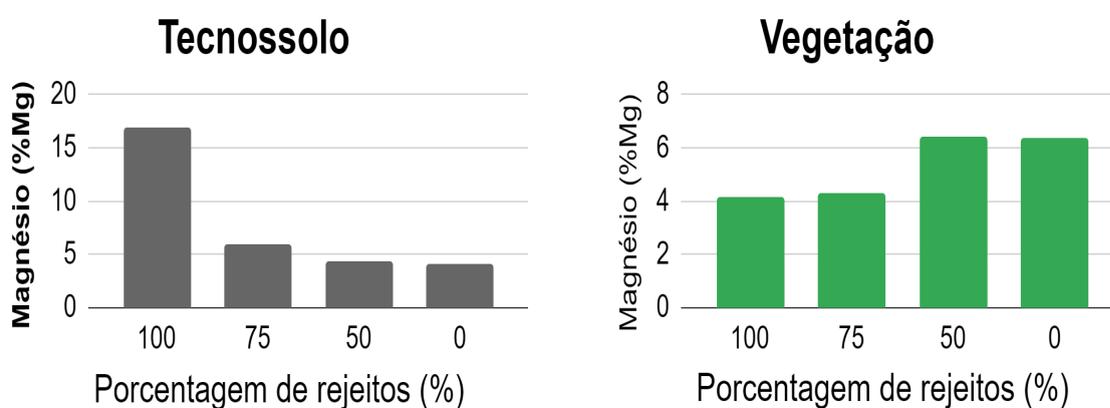
Fonte: Autora.

### 7.3 Correlação da análise elementar dos Tecno solos e sua vegetação

Os gráficos presentes nas figuras a seguir mostram os elementos químicos presentes nas amostras de Tecno solos e da vegetação.

- Magnésio (Mg);

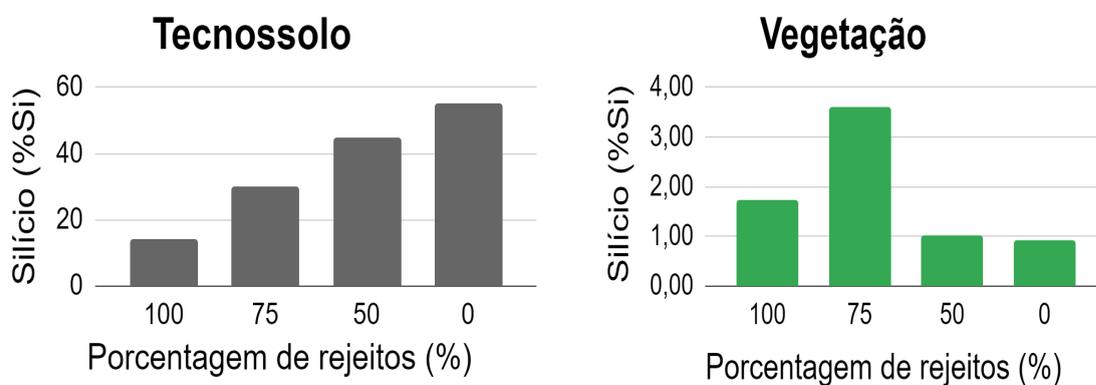
Figura 16 - Gráfico comparativo do teor de magnésio entre os Tecno solos dos experimentos e sua vegetação.



Fonte: Autora.

- Silício (Si);

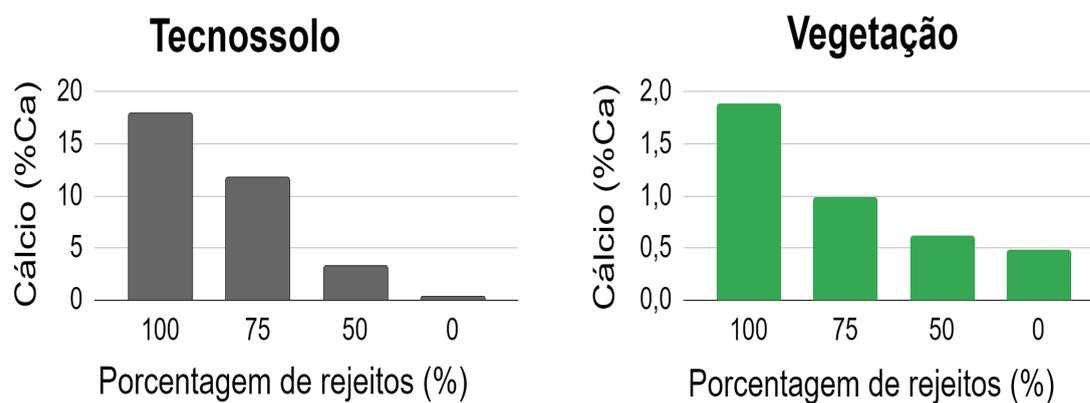
Figura 17 - Gráfico comparativo do teor de silício entre os Tecno solos dos experimentos e sua vegetação.



Fonte: Autora.

- Cálcio (Ca);

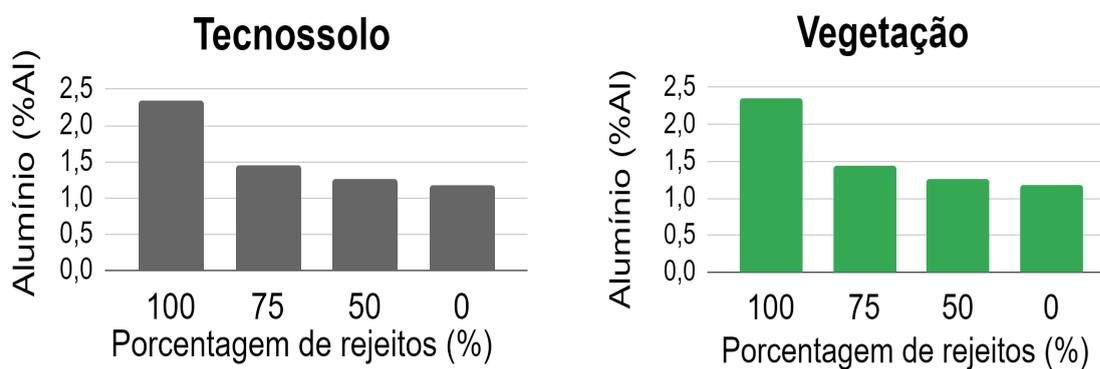
Figura 18 - Gráfico comparativo do teor de cálcio entre os Tecnoossolos dos experimentos e sua vegetação.



Fonte: Autora.

- Alumínio (Al);

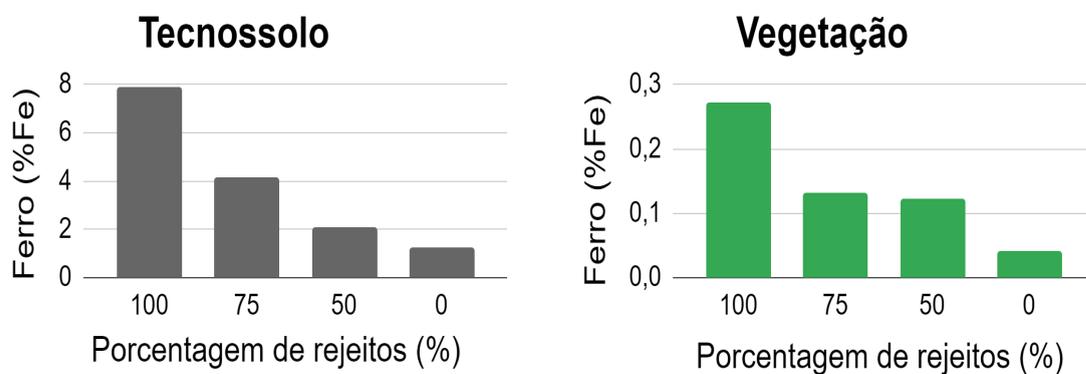
Figura 19 - Gráfico comparativo do teor de alumínio entre os Tecnoossolos dos experimentos e sua vegetação.



Fonte: Autora.

- Ferro (Fe);

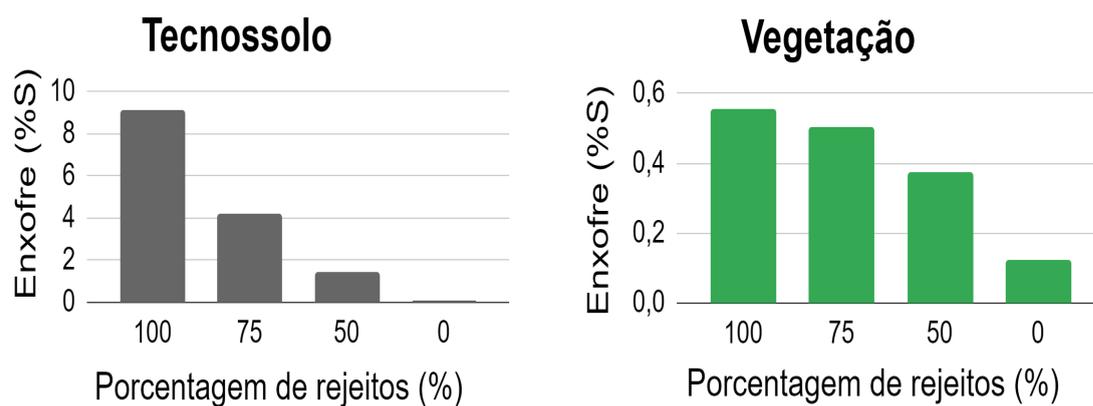
Figura 20 - Gráfico comparativo do teor de ferro entre os Tecno solos dos experimentos e sua vegetação.



Fonte: Autora.

- Enxofre (S);

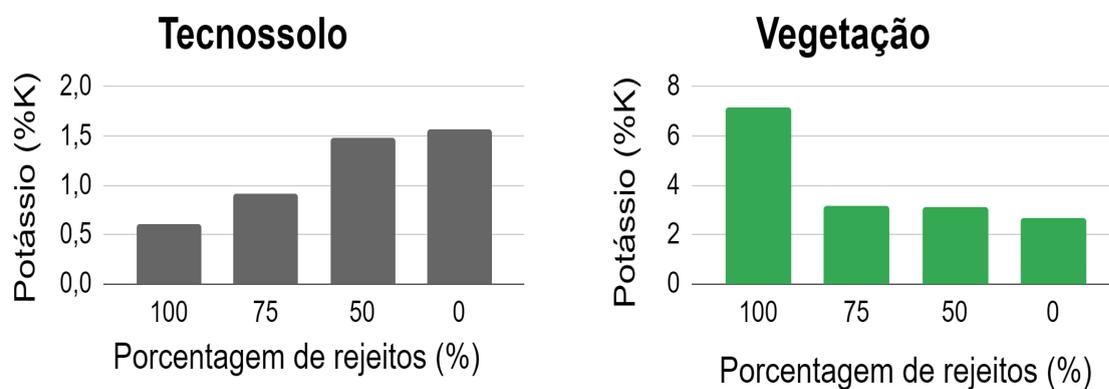
Figura 21 - Gráfico comparativo do teor de enxofre entre os Tecno solos dos experimentos e sua vegetação.



Fonte: Autora.

- Potássio (K);

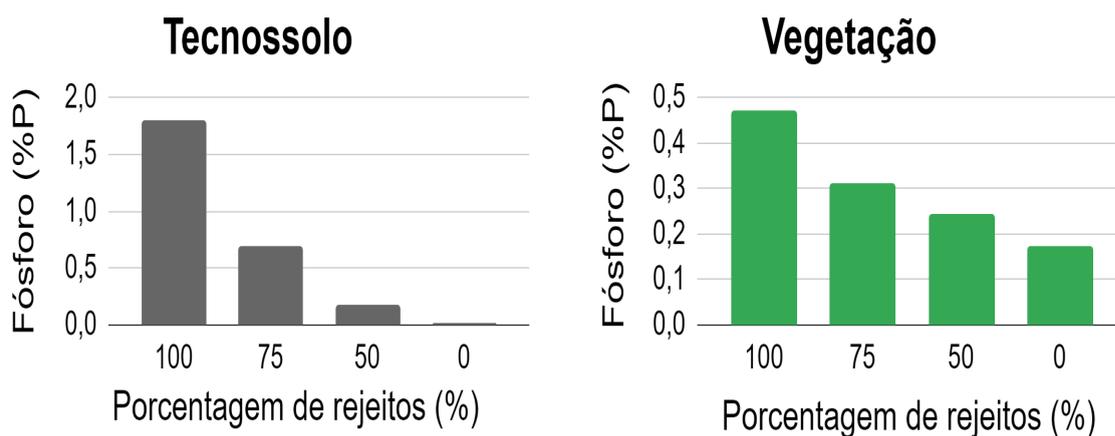
Figura 22 - Gráfico comparativo do teor de potássio entre os Tecnosolos dos experimentos e sua vegetação.



Fonte: Autora.

- Fósforo (P);

Figura 23 - Gráfico comparativo do teor de fósforo entre os Tecnosolos dos experimentos e sua vegetação.



Fonte: Autora.

Nota-se que os elementos cálcio (Ca), alumínio (Al), ferro (Fe), fósforo (P) e enxofre (S), tiveram comportamento semelhante em relação aos tratamentos, estando presente em maiores quantidades nos Tecnosolos produzidos somente com rejeito, e reduzindo o teor com o acréscimo de solo (e redução do percentual de rejeitos). O comportamento foi o mesmo no tecido vegetal das plantas nesses tratamentos, mostrando a possível absorção dos elementos pelas mesmas.

No caso dos elementos silício (Si) e potássio (K), os gráficos demonstram que esses elementos estão em maiores quantidades no tecido vegetal em comparação com os dos Tecnosolos de maior porcentagem de rejeitos (100% e 75%). E nos Tecnosolos com menor porcentagem de rejeitos (50% e 0%) esses elementos mostram maior teor nos Tecnosolos do que no tecido vegetal dos mesmos.

O elemento magnésio (Mg), apresenta maior teor nos Tecnosolos de (100% e 75%) de rejeitos, porém, no tecido vegetal dos mesmo experimento apresenta menor teor, mostrando que provavelmente as plantas não absorveram tão bem esse elemento. No entanto, nos Tecnosolos de porcentagem menores de rejeitos (50% e 0%), demonstrou que as plantas deste experimento absorveram melhor o elemento.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os Tecnosolos fabricados com rejeitos de calcário e pirítico mostram potencial para recuperação de áreas degradadas da mineração, quando misturados com solo. Todos os experimentos feitos com diferentes porcentagem de rejeitos forneceram nutrientes para a germinação de sementes. Pode-se perceber ainda, que quanto maior a porcentagem de solo, maior era o crescimento vegetal.

Em questões de parâmetros físicos, há grande desafio em questões granulométricas, pois quanto mais grossas, menor a retenção de umidade nos solos, o que poderia prejudicar o desenvolvimento das plantas, já que as sementes germinaram de acordo com a taxa de germinação. Isso pode ser uma das causas do menor crescimento nos Tecnosolos contendo apenas rejeitos devido a esses materiais se apresentarem em granulometria superior ao solo.

Nas análises elementares, os elementos químicos detectados, mostram-se em maiores teores nos Tecnosolos de maior porcentagem de rejeitos (100% e 75%), em comparação com o solo controle. Apontando uma possível absorção dos elementos pelas plantas, pois os elementos presentes nos Tecnosolos (100% e 75% de rejeitos), também se encontram nas análises do tecido vegetal das mesmas.

Em questões químicas, os rejeitos calcário são de composição dolomítica, os experimentos onde se tem mais porcentagem de rejeitos (100% e 75%), as análises demonstraram que teor de cálcio (Ca) está muito alto, teoricamente o calcário dolomítico contém 54,3% de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e 45,7% de carbonato de magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ), o que explicaria esse maior teor de cálcio (Ca) presente nos rejeitos em relação ao magnésio (Mg). Conseqüentemente, o cálcio em excesso inibe a absorção de magnésio, o que possivelmente esse excesso prejudicou o crescimento vegetal nesses experimentos.

Apesar do experimento de 75% de rejeitos apresentar bom teor de umidade, não houve bom desenvolvimento das plantas em comparação com o solo controle, pode ser sido pelo alto teor de cálcio (Ca), já mencionado anteriormente. O experimento de 50% de rejeitos e 50% de solo, mostrou-se eficaz tanto nos parâmetros físicos quanto nos parâmetros químicos, havendo bom desenvolvimento de crescimento vegetal.

Os Tecnosolos são uma estratégia para a gestão sustentável de resíduos e reciclagem de materiais descartados na mineração, sendo capazes de serem utilizados na recuperação da cava exaurida. Há inúmeras possibilidades de explorar diferentes combinações de rejeitos e plantas que podem resultar em diferentes solos com propriedades químicas e físicas únicas, para a reabilitação ambiental da área degradada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457/2016 - Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ALBERGARIA, J. Q. **Execução de aterro de rejeitos de mineração de calcário no município de Caçapava do Sul – RS. 2017. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2017.**

ANDRIGUETI, E. J. **Guia de recuperação de áreas degradadas**. São Paulo: SABESP, 2003.

BICCA, M. M. et al. **Tectonic evolution and provenance of the Santa Bárbara Group, Camaquã Mines region, Rio Grande do Sul, Brazil**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

BITAR, O.Y. **Avaliação da recuperação de áreas degradadas por mineração na região metropolitana de São Paulo**. 1997. 184 pp. Tese de Doutorado- Departamento de Engenharia de Minas. Escola Politécnica, Universidade Federal de São Paulo. São Paulo (1997).

BITENCOUR, M.F. **Metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS: Geologia e relações com o corpo granítico**. Simp. Sul Bras. Geologia, I, Porto Alegre, p. 37-48. 1983.

BLISS, J. D., HAYES, T. S., ORRIS, G. J., 2008. **Limestone - A Crucial and Versatile Industrial Mineral Commodity**. USGS Fact Sheet 2008-3089. <http://pubs.usgs.gov/fs/2008/3089/>.

BORTOLOTTI, O. J. (1988). **Termal metamorphism of marbles from Caçapava do Sul, RS, Southern Brazil**. *Ciência E Natura*, 10(10), 25–48. <https://doi.org/10.5902/2179460X25479>.

BORTOLOTTI, O.J. **Petrologia dos Mármore de Caçapava do Sul, RS**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 1986.

BORBA, A. W . **Evolução geológica da “Bacia do Camaquã” (Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul riograndense, RS, Brasil): uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, 2006.

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 1997. **Calcário** – Informe Setorial No 12, Novembro/97.

BRASIL, **Resolução CONAMA 420 / 2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essa substância sem decorrência de atividades antrópicas.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA N° 01 1986**.

Camps Arbestain, Z. Madinabeitia, M. Anza Hortalà, F. Macías-García, S. Virgel, F. Macías **Extractability and leachability of heavy metals in Technosols prepared from mixtures of unconsolidated wastes** Waste Manag., 28 (2008), pp. 2653-2666, 10.1016/j.wasman.2008.01.008

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros; **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 7. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

CARNEIRO, B.; KOLZER SCHROEDER, J.; PACHECO CASA NOVA, G.; MACHADO JAIME, D.; MARLENE SCHMIDT, A. Impacto ambiental da disposição de rejeitos em mineradora de calcário em Caçapava do Sul. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 9, n. 2, 3 mar. 2020.

CARVALHO, J. M. F., *et al.*. **Portuguese ornamental stones. In: Geonovas**. n° 26 (2013), p. 15-22.

CQFS - Comissão de Química e Fertilidade do Solo, Núcleo Regional Sul, 2004. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**, tenth ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Porto Alegre.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2014**, pg. 42 a 44.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 212p., 1997.

FABRIS, J. **Avaliação qualitativa das diferentes variedades de mármore daregião de Caçapava do Sul como matéria-prima para a produção de corretivos de acidez dos solos e cal**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Pampa. Caçapava do Sul, 2015.

FANNING, D.S.; FANNING, M.C.B. **Soil morphology, genesis, classification.** New York: John Wiley & Sons, 1989. p.395

FIRPO, B. A. **Produção de solo a partir de rejeito de carvão mineral.** Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, 2015.

FIRPO, B.A; AMARAL FILHO, J.R.; SCHNEIDER, I.A.H. **A brief procedure to fabricate soils from coal mine wastes based on mineral processing, agricultural, and environmental concepts.** Minerals Engineering, v.76, p.81 -86, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.11.005>

FIRPO, B. A.; WEILER, J.; SCHNEIDER, I.A.H. **Solo Fabricado a Partir de Rejeito de Carvão** In: V Congressos Brasileiro de Carvão Mineral, 2017, Criciúma. V CBCM.Criciúma: SATC, 2017

FREITAS, J. L. **Plano de fechamento para mina de calcário do Mato Grande, Caçapava do Sul.** Caçapava do Sul, 2019, Universidade Federal do Pampa.

G. SPOSITO **THE CHEMISTRY OF SOILS (SECOND ED.)**, OXFORD UNIVERSITY PRESS, INC., NEW YORK (2008), P. 342.

HOERLLE, G. S. *et al.* **Variedades dos mámoreos de Caçapava do Sul – aspectos genéticos e petrográficos.** UFGRS, 2009.

JOHN, VANDERLEY M.; PUNHAGUI, KATIA R. GARCIA & CINCOTTO. **Produção de Cal.** Em Economia De Baixo Carbono: Avaliação De Impactos De Restrições E Perspectivas Tecnológicas Ribeirão Preto-SP, 2014.

KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; KERN, M.; MACHADO, G.; MEXIAS, A.; SILVA, M.; WILLET, J.; FINKELMANN, R.; BURGER, H. **Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin:** 1. Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. International Journal of Coal geology, v.68, p.79–116, 2006.

LAL, R. **Restoring soil quality to mitigate soil degradation.** Sustainability, 7 (5) (2015), pp. 5875-5895, 10.3390/su7055875

LIMA, C. S. **O efeito da calcinação na qualidade do produto final do processo de produção da cal.** Universidade Federal do Pampa. Caçapava do Sul, 2019.

LONGO, R. M.; RIBEIRO, A. I.; MELO, W. J. de. **Uso de adubação verde na recuperação de solos degradados por mineração na floresta amazônica.** v.70, n. 1, p.139-146. Campinas, 2011.

LOPES, C. G. **Proveniência das rochas metassedimentares detríticas do complexo passo feio – terreno São Gabriel, Caçapava do Sul- RS.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

LOPES, C.G.; PIMENTEL, M.M.; PHILIPP, R.P.; GRUBER, L.; ARMSTRONG, R. & JUNGES, S. 2014. **Provenance of the Passo Feio Complex, Dom Feliciano Belt: Implications for the Age of Supracrustal Rocks of the São Gabriel Arc, Southern Brazil.** Journal of South American Earth Science. 58: 9-17.

LOPES, T. A. **Tecnossolos elaborados com resíduos da construção civil: potencial para a recuperação de áreas degradadas.** Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2020.

LOPES, T. L. **Técnicas utilizadas na recuperação ambiental de áreas degradadas pela mineração de calcário no município de Caçapava do Sul- RS.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Pampa. Caçapava do Sul, 2016.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. **Impactos ambientais da mineração no estado de São Paulo.** Estudos Avançados 24 (68) - Ministério Público do estado de São Paulo. São Paulo, 2010.

OLIVEIRA, T. R. C. **Caracterização tecnológica de minério de talco do município de Caçapava do Sul para desenvolvimento de rota de beneficiamento.** 2016. f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Tecnologia em Mineração, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2016.

PARISI, G. N. **Geoquímica elementar com ênfase em elementos terras raras em mármore do Bloco São Gabriel no Escudo Sul-Rio Grandense.** 49 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Pampa. Caçapava do Sul, 2018.

PASETTO, G. A. et al. **Modelagem Geológica Implícita em Mina de Mármoreno Complexo Metamórfico Passo Feio, Rio Grande do Sul, Brasil.** Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. 2019. DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2020\\_4\\_202\\_217](http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_202_217)

PINHEIRO JR, C. R. **Gênese e Caracterização dos Solos de Natureza Carbonática do Grupo Italva.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação em Agronomia – Ciênciado Solo, Rio de Janeiro, 2018.

PHILIPP, R.P., MACHADO, R., CHEMALE JR., F. **A Geração dos granitóides Neoproterozóicos do Batólito Pelotas: evidências dos isótopos de Sr e Nd e implicações para o crescimento continental da porção sul do Brasil.** In: Ianuzzi, R., Frantz, J.C. (Eds.), *Geologia do Rio grande do Sul*, pp. 59,77. PortoAlegre. 2007.

PIOLLI, L. A.; CELESTINI, R. M.; MAGON, M. **Teoria e prática em recuperação de área degradadas: Plantando a semente de um mundo melhor.** Secretária do meio ambiente, Governo Estadual de São Paulo. Serra Negra, 2004.

REBELO, F. **Riscos naturais e ação antrópica** . Coimbra: Imprensa da Universidade, 2003.

REBELO, F. **Uma experiência europeia em riscos naturais.** Coimbra: Minerva Coimbra, 2005

REGENSBURGER, B. **Recuperação de áreas degradadas pela mineração de argila através da regularização topográfica, da adição de insumos e serrapilheira, e de atratores da fauna.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós- Graduação em Agroecossistemas. Florianópolis, 2004.

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.

RUIZ, F., *et al.* **Revealing Tropical Technosols as an Alternative for Mine Reclamation and Waste Management.** Biology Department, Federal University of Ceará, Fortaleza, 2020.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Calcário e Dolomito.** Rochas e Minerais Industriais – CETEM/2005.

SAMPAIO, J. A., Almeida, S. L. M., 2009. **Calcário e Dolomito – Capítulo 16, in Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações,** Ed. Adão Benvindo da Luz e Fernando A. Freitas Lins.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impactos ambiental: conceitos e métodos.** 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. Edição Digital 2015.

SANTOS, J. A. G. **Recuperação e Reabilitação de Áreas Degradadas pela Mineração.** Cruz das Almas, BA: UFRB, 2017. 44p.; il.

SANTOS, S. E.; ABREU, M. M.; MACÍAS, F. **Importância do uso de Tecossolos na reabilitação de escombrelas da área mineira de São Domingos**. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2013.

SCHMITT, C. **Gênese de solos desenvolvidos de rochas sedimentares na depressão central do Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado). Programa de pós-graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

SCHAEFER, C. E. G. R.; et al. **Cenário histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecossolos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG**. Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico. v.24, n. 1/2, 2015.

SHINZATO, E. **O carste da área de proteção ambiental de Lagoa Santa (MG) e sua influência na formação de solos**. Tese (Mestrado). Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual do Norte Fluminense. 1998.

SILVA, J. O. **Perfil do calcário**. Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral-SGM. Ministério de minas e energia – MME. 2009.

SILVA, L. C. M. **Rompimento da barragem de fundão em Mariana MG: caracterização e qualidade física de tecnossolo formado pela deposição dos rejeitos**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2017.

SOLIANI JR., E. **Os dados geocronológicos do Escudo Sul-rio grandense e suas implicações de ordem geotectônica**. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo (USP), 239 p. São Paulo, 1986.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.) **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SOUZA, W. R. Q. **Uso do biocarvão na recuperação de tecnossolos formados por rejeito da mineração de ferro**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2018.

TELLES, P. N. G. **Mapeamento Hidrogeoquímico do Município de Caçapavado Sul**. 78 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pampa. Caçapava do Sul, 2016.

WEILER, J.; FIRPO, B.A.; SCHNEIDER, I.A.H. **Coal waste derived soil-like substrate: An opportunity for coal waste in a sustainable mineral scenario**. Journal of Cleaner Production, v. 174, p. 739-745, 2018.

WEILLER, J.; FIRPO, B. A.; SCHNELDER, I. A. H. **O uso de tecnossolos na recuperação.** Saneamento ambiental – nº 191 – 2019.

WEILLER, J. **BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DA RECUPERAÇÃO DA PIRITA NA MINERAÇÃO DE CARVÃO EM SC.** Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Porto Alegre, 2016.

WONG, M. H. **Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasison metal contaminated soils.** Chemosphere, v. 50, 775– 780. 2003.

## ANEXOS

## Anexo 1 - Laudo químico do solo.

MEC - Universidade Federal de Santa Maria Centro de Ciências Rurais -  
Departamento de Solos Santa Maria/RS Cep:97105-900 Fone: (55) 3220-8153  
<http://www.ufsm.br/labsolo> Laudo de Análise de Solo.

## Informações emitidas pelo laboratório e de responsabilidade do técnico

Protocolo	Identificação da amostra
11941	Solo controle 0%
11942	Solo 50% rejeito 50%
11943	Solo 75% rejeito 25%
11944	Solo 100% rejeito

## Diagnóstico para acidez do solo e calagem

Protocolo	pH água 1:1	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC efet.	Saturação (%)		Índice SMP
		cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup>					Al	Bases	
11941	6,1	7,4	2,7	0,0	3,1	10,5	0,0	76,8	6,3
11942	6,5	19,6	3,0	0,0	1,6	22,9	0,0	93,5	6,9
11943	6,3	67,4	4,2	0,0	1,6	71,8	0,0	97,8	6,9
11944	6,0	77,8	8,7	0,0	2,5	86,8	0,0	97,2	6,5

## Diagnóstico para macronutrientes e recomendação de adubação NPK-S

Protocolo	% MO	% Argila	Textura	S	P-Mehlich	C Total'	K	CTC pH7	K
	m/v			mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	
11941	4,1	14,0	4,0	--X--	16,0	--X--	0,286	13,6	112,0
11942	4,8	8,0	4,0	--X--	69,8	--X--	0,307	24,5	120,0
11943	7,2	6,0	4,0	--X--	39,8	--X--	0,246	73,4	96,0
11944	12,6	8,0	4,0	--X--	50,8	--X--	0,235	89,3	92,0

## Diagnóstico para micronutrientes e relações molares

Protocolo	Cu	Zn	B	Fe	Mn	Na	Relações Molares		
	mg/dm <sup>3</sup>						Ca/Mg	(Ca+Mg)/K	K/(Ca+Mg) <sup>1/2</sup>
11941	--X--	--X--	--X--	--X--	--X--	--X--	2,7	35,50	0,09
11942	--X--	--X--	--X--	--X--	--X--	--X--	6,6	73,60	0,065
11943	--X--	--X--	--X--	--X--	--X--	--X--	16	290,90	0,029
11944	--X--	--X--	--X--	--X--	--X--	--X--	8,9	368,30	0,025

Os dados analíticos são de exclusividade da amostra

Vinculado à ROLAS-RS/SC



Assinatura digital

**7E-AB-78-4E-4A-B5-F3-AA-E4-66-65-4F-AD-B2-5C-BC**

Para autenticar acesse <http://silas.ccr.ufsm.br>, em "Autenticar" informe a sequência acima.

**Responsável técnico:** Lucas Lopes Coelho - CREA/RS 225961

Pagamento Realizado

\* Determinado em analisador elementar-combustão seca