

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ELIS FARIAS HILÁRIO**

**DINÂMICA DE LIXIVIAÇÃO DE MACRO E MICRONUTRIENTES EM SOLO  
REMINERALIZADO COM BASALTO**

**FRANCISCO BELTRÃO - PR**

**2022**

**ELIS FARIAS HILÁRIO**

**DINÂMICA DE LIXIVIAÇÃO DE MACRO E MICRONUTRIENTES EM SOLO  
REMINERALIZADO COM BASALTO**

**Dynamics of macro and micronutrients leaking in soil remineralized with basalt**

Trabalho de Conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Michelle Milanez França.

Coorientadora: Thalita Grando Rauen.

**FRANCISCO BELTRÃO - PR**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ELIS FARIAS HILÁRIO**

**DINÂMICA DE LIXIVIAÇÃO DE MACRO E MICRONUTRIENTES EM SOLO  
REMINERALIZADO COM BASALTO**

Trabalho de Conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Ambiental da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 24 de junho de 2022

---

Michelle Milanez França  
Titulação (Doutorado)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Francisco Beltrão

---

Thalita Grandó Rauen  
Titulação (Doutorado)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Francisco Beltrão

---

Diego Moraes  
Titulação (Mestrado)  
Secretaria de Estado da Educação do Paraná - SEED

**FRANCISCO BELTRÃO - PR**

**2022**

## DEDICATÓRIA

Durante esses dois anos de realização desse trabalho, o mundo estava, e ainda está enfrentando as consequências de um vírus, e mais do que nunca, a ciência foi responsável por nos dar esperança de dias melhores.

Dito isso, gostaria de dedicar todo o esforço desse trabalho as pessoas que infelizmente perderam seus entes queridos para essa doença, e a todos profissionais que lutaram por nós nessa batalha.

Dedico em especial ao meu grande amigo Marcos Vinícius (In Memoriam), este trabalho é seu, você que se tornou meu irmão de coração, que incentivou e vibrou com cada conquista minha, espero que daí você sinta todo o amor que deixou com a gente.

Por último e mais importante, meus pais. Vocês são meu coração, minha inspiração e amores da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Para chegar até aqui foi necessário muito esforço, dedicação e principalmente paciência, de pessoas até que nunca conheci, e com isso, deixo meu agradecimento a todos que contribuíram de alguma forma para essa aventura que agora se encerra.

Gostaria de iniciar agradecendo as duas pessoas mais importantes da minha vida: Leonice e Euler, também conhecidos como melhores pais do mundo. Vocês foram os responsáveis de todos os meus sonhos realizados até aqui, me ensinaram por meio do amor a importância da educação, seguraram todas as barras possíveis para que hoje pudesse realizar esse sonho, que, aliás, é nosso. Amo vocês além daqui, muito obrigada!

Família, como foi difícil acompanhar as notícias de longe, mas em nenhum momento vocês me deixaram na mão, pelo contrário, me incentivaram a continuar sem olhar para trás, para mim foi muito importante sentir o amor e carinho de vocês nesses anos, então deixo aqui todo meu agradecimento por tudo que fizeram por mim e nossa família.

E falando em família, nessa caminhada encontrei amigos que fizeram esse papel perfeitamente, pessoas que vou levar para sempre em meu coração, amigos de infância que puderam vibrar comigo desde o vestibular, amigos que fiz na faculdade, amigos que viraram irmãos, sim estou falando de vocês Açucena, Diego, Gabriele e Marcos Vinícius (In Memoriam), muito obrigada por cada conselho, risada, choro e abraço, vocês foram e são essenciais em meus dias.

E se teve alguém que me acompanhou de pertinho, que me consolou, ajudou, lidou e me amou, foi você Thais Helena. Seu amor e presença foram fundamentais para meu crescimento como profissional, como mulher, e como sua namorada, você também foi a peça chave para a realização desse trabalho, muito obrigada.

Agradeço a todos os professores que me incentivaram a cursar uma universidade, e que me mostraram o valor da educação pública de qualidade, a UTFPR-FB por se tornar minha segunda casa nesses anos e aos servidores que fazem isso tudo acontecer e, agradeço minha orientadora Michelle por todos esses anos de ensinamento, trabalho e colaborações.

E por fim agradeço ao LabSolos e, o Laboratório de Solos da IFPR – Palmas/PR pelo auxílio na construção do conhecimento e nas análises efetuadas para esse trabalho.

*“Torne o solo do seu coração arável; alimente-o com os minerais e nutrientes necessários para um bom cultivo. Não te esqueças que para que esta terra seja boa para o cultivo, o ambiente tem de ser favorável.”*

*(Eronildo R. Paulino)*

## RESUMO

Ao longo dos anos, o desenvolvimento econômico brasileiro vem sendo contribuído principalmente pelo grande potencial de produção atrelado às atividades de agricultura e de mineração. Embora sejam dois setores econômicos estáveis, as atividades não possuem interesses em comum, porém, ao citar a necessidade de adubação e fertilização dos solos para produção agrícola, o pó de rocha apresenta-se como um composto interessante na suplementação e até substituição dos fertilizantes convencionais solúveis utilizados atualmente que são gerados em elevadas quantidades. Além disso, pode ser considerado um produto atrativo pela sua capacidade de liberar lentamente macro e micronutrientes contidos, sendo estes por sua vez, essenciais à nutrição do solo e das plantas. O presente trabalho avaliou a dinâmica de lixiviação dos macros elementos cálcio, sódio, potássio, magnésio e fósforo, e micro elementos, cobre, ferro, manganês e zinco provenientes do pó de rocha basáltico, em solo cultivado com soja, simulando a precipitação média anual da cidade de Marmeleiro – PR. Para os ensaios de lixiviação, realizados em triplicatas, designou-se doses de 5, 6, 7, 8, 9 e 10 t ha<sup>-1</sup> de remineralizador, codificados em tratamentos E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub>, E<sub>4</sub>, E<sub>5</sub> e E<sub>6</sub>, respectivamente. Foi possível destacar os tratamentos E<sub>1</sub> e E<sub>3</sub>, equivalentes a 5 e 7 ton ha<sup>-1</sup>, respectivamente, como contribuintes para elevação dos teores de pelo menos 4 nutrientes, sendo eles o fósforo, o magnésio, o cobre, o ferro, o manganês, e o zinco, seguidos pelos tratamentos E<sub>4</sub> e E<sub>5</sub>, equivalentes a 8 e 9 ton ha<sup>-1</sup>, que contribuíram para o acréscimo dos teores de cálcio, cobre, ferro, manganês e zinco, apenas o ferro teve seu teor ampliado por todos os tipos de doses implementadas, ao contrário do potássio que não obteve mudanças em seu teor em nenhum tipo de tratamento aplicado.

Palavras-chave: ensaio de lixiviação; pó de rocha; rochas basálticas; rochagem.

## ABSTRACT

Over the years, Brazilian economic development has been mainly contributed by the great production potential linked to agricultural and mining activities. Although they are two stable economic sectors, the activities do not have interests in common, however, when citing the need for fertilization and fertilization of soils for agricultural production, rock dust presents itself as an interesting compound in supplementation and even replacement of conventional fertilizers. very soluble currently used. In this way, they are generated in high amounts. In addition, it can be considered an attractive product for its ability to slowly release macro and micronutrients contained, which in turn, are essential for soil and plant nutrition. The present work evaluated the leaching dynamics of the macro elements calcium, sodium, potassium, magnesium and phosphorus, and micro elements, copper, iron, manganese and zinc from basaltic rock dust, in a soil cultivated with soybean, simulating the average precipitation of the city of Marmeleiro – PR. For the leaching tests carried out in triplicates, doses of 5, 6, 7, 8, 9 and 10 t ha<sup>-1</sup> of remineralizer were assigned, coded in treatments E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub>, E<sub>4</sub>, E<sub>5</sub> and E<sub>6</sub>, respectively. It was possible to highlight treatments E<sub>1</sub> and E<sub>3</sub>, equivalent to 5 and 7 ton ha<sup>-1</sup>, respectively, as contributors to increasing the levels of at least 4 nutrients, namely phosphorus, magnesium, copper, iron, manganese, and zinc, followed by treatments E<sub>4</sub> and E<sub>5</sub>, equivalent to 8 and 9 ton ha<sup>-1</sup>, which contributed to the increase in the levels of calcium, copper, iron, manganese and zinc, only iron had its content increased by all types of doses implemented, unlike potassium, which did not change its content in any type of treatment applied.

Keywords: leaching test; rock powder; basalt rocks; stonemeal.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 - Classificação dos poros do solo.....	19
Figura 2 - Esquema da troca de cátions no solo .....	20
Figura 3 - Coleta das amostras de solo.....	26
Figura 4 - Secagem das amostras de solo coletadas.....	26
Figura 5 - Amostra do remineralizador de basalto pronto para uso após tratamento térmico e físico. ....	28
Figura 6 - Croqui do módulo de madeira contendo seus parâmetros.....	29
Figura 7 - Módulo de madeira operado concluído .....	30
Figura 8 - Destaque do reservatório de água destilada, leito fixo e tecido.....	31
Figura 9 - Visão geral do módulo contendo os reservatórios e leitos fixos durante o experimento.....	34
Figura 10 - Visão geral do módulo contendo os reservatórios e leitos fixos durante o experimento.....	35
Figura 11 - Amostras acidificadas e concebidas para envio ao laboratório.....	36
Figura 12 - Caracterização mineralógica do pó por análise de difração de raios X...40	
Figura 13 - Acumulado de Cálcio liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.....	41
Figura 14 - Acumulado de Fósforo liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.....	43
Figura 15 - Acumulado de Magnésio liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.....	44
Figura 16 - Acumulado de Potássio liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.....	47
Figura 17 - Acumulado de Sódio liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.....	49
Figura 18 - Acumulado de Cobre liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.....	50
Figura 19 - Acumulado de Ferro liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.....	52
Figura 20 - Acumulado de Manganês liberado por sete tipos de doses de rocha moída .....	54
Figura 21 - Acumulado de Zinco liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teores dos elementos mapeados no derrame fáceis Cordilheira Alta ...	22
Tabela 2 - Elementos tóxicos e seu teor máximo permitido nos remineralizadores	24
Tabela 3 - Apuração das propriedades químicas do solo. ....	38
Tabela 4 - Quantia de Cálcio percolado em mg L <sup>-1</sup> após os ensaios. ....	41
Tabela 5 - Análise exploratória dos dados para o elemento Cálcio.....	42
Tabela 6 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% do elemento Cálcio...	42
Tabela 7 - Quantia de Fósforo percolado em mg L <sup>-1</sup> após os ensaios. ....	43
Tabela 8 - Análise exploratória dos dados para o elemento Fósforo. ....	43
Tabela 9 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para o elemento Fósforo. ....	44
Tabela 10 - Quantia de Magnésio percolado em mg L <sup>-1</sup> após os ensaios.....	45
Tabela 11 - Análise exploratória dos dados para o elemento Magnésio. ....	45
Tabela 12 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para o elemento Magnésio. ....	45
Tabela 13 - Quantia de Potássio percolado em mg L <sup>-1</sup> após os ensaios. ....	46
Tabela 14 - Análise exploratória dos dados para o elemento Potássio.....	46
Tabela 15 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para o elemento Potássio.....	46
Tabela 16 - Quantia de Sódio percolado em mg L <sup>-1</sup> após os ensaios.....	47
Tabela 17 - Análise exploratória dos dados para o elemento Sódio. ....	48
Tabela 18 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para o Sódio.....	48
Tabela 19 - Quantia de Cobre percolado em mg L <sup>-1</sup> após os ensaios. ....	49
Tabela 20 - Análise exploratória dos dados para o elemento Cobre.....	49
Tabela 21 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para o Cobre. ....	50
Tabela 22 - Quantia de Ferro percolado em mg L <sup>-1</sup> após os ensaios.....	51
Tabela 23 - Análise exploratória dos dados para o elemento Ferro. ....	51
Tabela 24 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para elemento Ferro.	51
Tabela 25 - Quantia de Manganês percolado em mg L <sup>-1</sup> após os ensaios.....	52
Tabela 26 - Análise exploratória dos dados para o elemento Manganês. ....	53
Tabela 27 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para o elemento Manganês.....	53
Tabela 28 - Quantia de Zinco percolado em mg L <sup>-1</sup> após os ensaios. ....	54
Tabela 29 - Análise exploratória dos dados para o elemento Zinco.....	54
Tabela 30 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para elemento Zinco.	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Cc	Capacidade de Campo
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
Cfa	Clima Temperado Subtropical
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
fa	Fator de Aceleração do Processo
fc	Fator de Correção
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
h	Teor de Umidade
ha	Hectare
IAPAR	Instituto Agrônômico do Paraná
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MINEROPAR	Minerais do Paraná
mm	Milímetro
Ms	Massa de Solo
Pa	Massa d'água
pH	Potencial Hidrogeniônico
ppm	Parte por Milhão
Ps	Massa Solo Enxuto
PVC	Policloreto de Vinila
SSEc	Solo Seco em Estufa (coluna)
SSEp	Solo Seco em Estufa (placa petri)
ton	Tonelada
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
Va	Volume de água
Vd	Volume diário de água percolada
Vp	Volume anual de água percolada

## LISTA DE SÍMBOLOS

NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio
Ca, Ca <sup>2+</sup> , CaO	Cálcio, Óxido de Cálcio
K, K <sup>+</sup> , K <sub>2</sub> O	Potássio, Óxido de Potássio
Mg, Mg <sup>2+</sup> , MgO	Magnésio, Óxido de Magnésio
P	Fósforo
Cu	Cobre
Fe	Ferro
Zn	Zinco
Al, Al <sup>3+</sup>	Alumínio
Mn	Manganês
H <sup>+</sup>	Hídron
N	Nitrogênio
As	Arsênio
Cd	Cádmio
Hg	Mercúrio
Pb	Chumbo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivos gerais.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Solo.....</b>	<b>18</b>
3.1.1	Porosidade .....	19
3.1.2	Capacidade de troca de cátions (CTC) .....	20
3.1.3	Lixiviação de nutrientes .....	21
<b>3.2</b>	<b>Rochas basálticas .....</b>	<b>21</b>
<b>3.3</b>	<b>Remineralizador.....</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>Ponto de amostragem.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>Coleta e preparo dos materiais .....</b>	<b>25</b>
4.2.1	Solo .....	25
4.2.2	Remineralizador .....	28
<b>4.3</b>	<b>Ensaio de Lixiviação .....</b>	<b>28</b>
4.3.1	Colunas de lixiviação.....	29
4.3.2	Determinação da quantidade de remineralizador .....	31
4.3.3	Volume de água (Va) e vazão aplicado.....	32
4.3.4	Andamento do ensaio de lixiviação .....	33
<b>4.4</b>	<b>Análises Químicas.....</b>	<b>36</b>
4.4.1	Solo .....	36
4.4.2	Remineralizador .....	36
4.4.3	Solução lixiviada.....	37
<b>4.5</b>	<b>Análises Estatísticas.....</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>38</b>
<b>5.1</b>	<b>Solo.....</b>	<b>38</b>
<b>5.2</b>	<b>Remineralizador.....</b>	<b>40</b>
<b>5.3</b>	<b>Macronutrientes.....</b>	<b>41</b>
5.3.1	Cálcio .....	41
5.3.2	Fósforo .....	42

5.3.3	Magnésio.....	44
5.3.4	Potássio.....	46
5.3.5	Sódio .....	47
<b>5.4</b>	<b>Micronutrientes.....</b>	<b>49</b>
5.4.1	Cobre.....	49
5.4.2	Ferro .....	51
5.4.3	Manganês.....	52
5.4.4	Zinco.....	54
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O potencial de produção agrícola é dependente de diversos fatores que devem ser manejados para assegurar a demanda por alimentos, medicamentos e biocombustíveis. A fragilidade da escassez de insumos agrícolas e ameaça ambiental, por exemplo, ilustram desafios que necessitam ser conduzidos por pesquisas direcionadas a tecnologias sustentáveis e eficientes (MARTINAZZO et al., 2020).

Tais setores, acarretados pelo crescimento populacional, apresentam desafios relacionados à correta gestão dos recursos naturais necessários a tal prática. Um dos fatores mais relevantes é o estado de conservação do solo, que atualmente está sob pressão devido à intensificação do seu uso com a ausência de técnicas de manejo e preservação, resultando em solos erodidos, salinizados, acidificados e empobrecidos nutricionalmente (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA - FAO, 2015).

Nesse sentido, o consumo de fertilizantes no Brasil vem crescendo em decorrência dos seus solos pobres em macronutrientes como o fósforo e o potássio, tornando-o ocupante da 4ª posição referente ao maior consumidor do mundo (MARTINAZZO et al., 2020). Entretanto, a produção interna desses insumos não é suficiente para suprir toda a demanda necessária, elevando o custo de produção agrícola associado à necessidade de adubação verificada nos solos brasileiros (MELAMED; GASPAR; MIEKELEY, 2007).

Existe preocupação e hipóteses relevantes, na qual a eutrofização das águas de superfície e subterrâneas, em grande parte, seja causado pela rápida solubilização e lixiviação do fósforo e do nitrogênio, macro elementos utilizados principalmente na formulação dos fertilizantes NPK e adubos agrícolas (CETEM, 2010).

O acúmulo destes nutrientes dissolvidos nos corpos hídricos eleva a proliferação de algas e cianobactérias, provocando a redução da passagem de luz e conseqüentemente à diminuição das trocas gasosas, ocasionando a morte de animais e plantas pela baixa oxigenação da água (CAIXETA et al., 2015).

Com o intuito de minimizar esses impactos ambientais negativos e promover a sustentabilidade econômica na agricultura, a rochagem atualmente tem despertado o interesse de institutos de pesquisas, agricultores e empresas mineradoras.

O processo de rochagem apresenta-se como uma técnica capaz de induzir a remineralização dos solos por meio do acréscimo de pó de rocha proveniente da atividade de mineração. Deste modo, é uma técnica utilizada pela sua atraente capacidade de complementar, e em alguns casos, substituir o uso de fertilizantes convencionais na agricultura (COLA; SIMÃO, 2012).

Além disso, sua utilização mostra-se benéfica pela sua capacidade de liberar gradualmente e reservar os nutrientes essenciais ao funcionamento metabólico das plantas, bem como manter a fertilidade do solo na melhoria de suas propriedades físico-químicas (BRASIL, 2013).

Visto que os remineralizadores provenientes da britagem de rochas ornamentais têm mostrado grande potencial devido a lenta liberação de seus macros e micronutrientes a solução do solo, diminuindo as perdas e impactos causados pelos fertilizantes convencionais, o presente trabalho visa analisar por meio de ensaios de bancada, a lixiviação de macro e micronutrientes provenientes do pó de rocha basáltica, coletada na cidade de Francisco Beltrão - PR, como forma de verificar o potencial remineralizador desse minério em um solo com cultivo de soja.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

Avaliar o potencial de um remineralizador de rocha basáltica na disponibilidade de macronutrientes e micronutrientes da solução lixiviada em um solo com cultivo de soja.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Coletar e preparar amostras de um solo cultivado, para a composição das colunas de lixiviação.
- Caracterizar quimicamente as amostras de solos coletadas.
- Construir as colunas de lixiviação para a realização dos ensaios, simulando a precipitação média anual da cidade de Marmeleiro/ PR.
- Verificar em diferentes dosagens de aplicação do remineralizador nos solos, a liberação dos macros nutrientes Ca, K, Mg, Na e P, e dos micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn.
- Comparar os teores dos nutrientes nas soluções lixiviadas, para determinar se o pó de rocha é capaz de aumentar essas concentrações.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Solo

A Terra primordialmente é constituída por rochas que são materiais consolidados e resistentes, formados em grande parte por minerais silicáticos, e quando expostas ao ar, ao Sol e a água, acabam sofrendo processos de intemperismo e pedogênese, na qual a desagregação e decomposição da mesma dão origem ao solo (TOLEDO; TEIXEIRA; BOUROTTE, 2014).

Deste modo, o solo é um conjunto de corpos naturais constituídos de partes líquidas, sólidas e gasosas, dinâmicas, formados por materiais minerais e orgânicos que ocupam a maior parte do manto superficial do planeta e, eventualmente vem sendo modificados pelas interferências antrópicas. Se examinados a partir da superfície, consistem em camadas paralelas organizadas em horizontes, distinguidos pelo material de origem inicial refletidos pela interação entre litosfera-atmosfera-hidrosfera (EMBRAPA, 2018). A camada superior do solo caracteriza-se pela riqueza em matéria orgânica e, a inferior, formada de cascalhos, areias e lama até a rocha mãe (SILVA; CHAVES; LIMA, 2009).

As alterações nas propriedades do solo afetam os sistemas de produção agrícola, visto que sua estrutura física está relacionada a sustentação do crescimento vegetal, sendo base fundamental para essa atividade (BLAINSKI et al., 2008). Nesse sentido, é necessário manter um manejo adequado desse recurso, de forma a melhorar ou manter as propriedades físicas responsáveis por exercer ancoragem e crescimento das raízes, como a porosidade e a densidade, além de oferecer suprimento de água, nutrientes e oxigênio, conseqüentemente mantendo a produtividade do solo (MARTINS, 2011).

A degradação do solo está associada às frequentes perturbações, devido a intensificação de seu uso sem o correto manejo e preservação, capazes de alterar suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, de forma a afetar os fluxos de trocas realizados nesse sistema, assim, descaracterizando e conseqüentemente degradando o solo (AZEVEDO; KAMINSKI, 1995).

A queda na fertilidade do solo está associada à sua degradação química, ocasionada através da diminuição dos teores de material orgânico e dos macros e micronutrientes, diminuindo a disponibilidade desses atributos as plantas (SAMPAIO et al., 2003).

De acordo com Bonini & Alves (2012), usualmente a redução do pH do solo pode acarretar a elevação dos teores de Al e Mn, sendo outro fator importante na indicação da qualidade do solo.

Em áreas degradadas, nota-se que o solo possui características de material mineral e para sua recuperação, faz-se necessário também, a reestruturação física, por meio da inserção de material orgânico, com objetivo de retornar a sua composição de espécies e estruturas de comunidade (D'ANTONIO; MEYERSON, 2002). Desse modo, não é indicado apenas à utilização de fertilizantes para reintegração dos nutrientes necessários ao solo, sem antes proporcionar a reorganização de sua estrutura física (INPI, 1998).

### 3.1.1 Porosidade

A capacidade do solo de reservar e transmitir líquidos e gases é determinada pela porosidade do solo, característica física indicada pelo volume de espaços vazios existentes, sejam eles, poros, fendas e canais, entre as partículas individuais e agregadas do solo (SILVA; CHAVES; LIMA, 2009).

A distribuição da porosidade possui a mesma proporção de variação das misturas dos sólidos do solo e da sua composição mineral, determinando as dimensões dos poros, classificadas em microporos e macroporos (FARIAS et al., 2013), responsáveis pela retenção da água, pela aeração e drenagem do solo.

A classificação dos poros do solo conforme seus tamanhos (SILVA; CHAVES; LIMA, 2009) estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos poros do solo.

<b>Poros</b>	<b>Tamanho dos poros (mm)</b>	<b>Classificação</b>
<b>Muito pequenos</b>	< 0,5	Até 1mm
<b>Pequenos</b>	0,5 a 1	Microporos
<b>Médios</b>	1 a 3	Maior que 1mm
<b>Grandes</b>	3 a 5	
<b>Muito grandes</b>	> 5	Macroporos

Fonte: Adaptado de Silva; Chaves; Lima (2009)

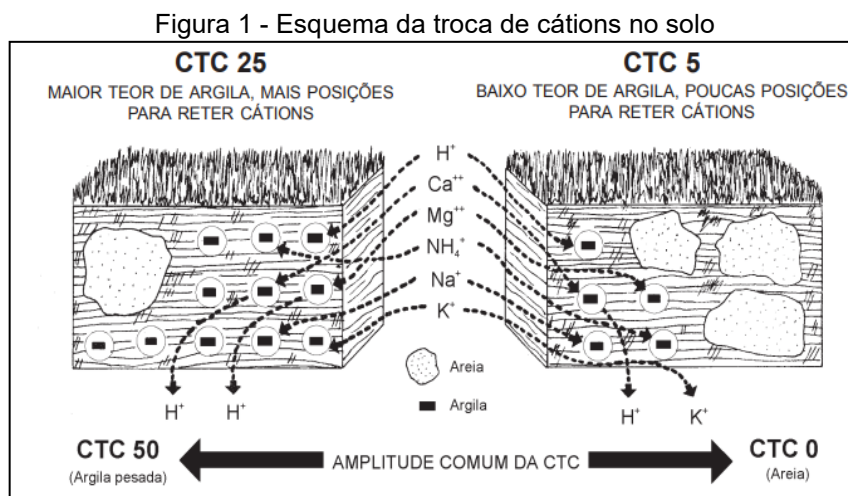
À medida que a água chuva ou de irrigação preenche os poros, o solo vai umedecendo e conseqüentemente diminuindo seus espaços vazios, podendo atingir a totalidade desses espaços. Farias et al. (2013) indica que essa condição é proporcionada pela máxima capacidade de retenção de água, ou seja, a água

acrescentada nessa condição não será mais reservada e sim drenada devido ao mecanismo gravitacional.

De acordo com Rosa (2010), a aeração, drenagem, e resistência à penetração das raízes, são interferidas pela porosidade do solo, conseqüentemente agindo sobre as relações de aproveitamento de água e absorção de nutrientes, componentes necessários para o desenvolvimento de culturas, pois influenciam na fertilidade e estruturação do solo.

### 3.1.2 Capacidade de troca de cátions (CTC)

A capacidade de retenção de cátions trocáveis no solo refere-se à quantidade de carga negativa ali presente, sendo os cátions retidos nos colóides do solo remanejados e trocados por outros cátions, conforme a Figura 01. Segundo a EMBRAPA (2010), o valor da CTC é diretamente proporcional a capacidade de retenção dos cátions e com a elevação dos teores de material orgânico.



Fonte: INPI (1998)

As superfícies carregadas elétricas das argilas coloidais, dos óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) e das substâncias húmicas, fazem com que íons presentes sejam atraídos até essa superfície formando uma ligação reversível (EMBRAPA, 2010).

Concomitantemente, segundo a EMBRAPA (2010), o Fe e o Al são os principais responsáveis pela CTC, caracterizada pela gradual liberação de nutrientes essenciais a fertilidade do solo diminuindo a aplicação excessiva de fertilizantes. Os cátions Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup>, indicam uma boa nutrição do solo enquanto para componentes tóxicos H<sup>+</sup> e Al<sup>3+</sup> atestam possível solo empobrecido.

### 3.1.3 Lixiviação de nutrientes

A perda de nutrientes nos solos é acarretada pela lixiviação e agravada principalmente por altas pluviosidades e escoamento superficial, gerados pela compactação e impermeabilidade dos solos (FARIAS et al., 2013).

Constantemente, os solos estão sendo lavados por esses processos, perante a isso, tem-se tornado alvo de pesquisas analisando tanto macronutrientes como o K, N, Ca e Mg necessários as plantas, quanto aos metais tóxicos encontrados (BERTONCINI; MATTIAZZO, 1999).

Os trabalhos não têm enfoque apenas nas perdas de fertilidade do solo alavancadas pelo processo de lixiviação, mas também aos impactos ambientais negativos provocados nos recursos naturais, principalmente quando esses compostos são acumulados em corpos hídricos causando a eutrofização desses recursos (CAIXETA et al., 2015).

As características físicas e químicas do solo interferem consideravelmente no carreamento dos nutrientes. Os solos salinos, por exemplo, são formados em consequência da falta de precipitações. Segundo Silva, Chaves e Lima (2009), em climas áridos e semiáridos, a remoção das bases chega a ser nula, enquanto nas regiões de climas tropicais, os solos possuem características ácidas devido ao alto índice de pluviosidade. Além disso, a acidez do solo interfere no desenvolvimento das plantas pela transformação da forma química dos nutrientes dificultando a absorção.

Nesse sentido, a mobilidade dos nutrientes do solo disponibilizados pelos fertilizantes convencionais, tornou-se um argumento e incentivo para buscas de alternativas sustentáveis de adubação, visto que sua perda acarreta em prejuízos financeiros potencializados pela falta de manejo eficiente, proporcionando o aumento dos custos de produção agrícola pela alta necessidade de reposição desses nutrientes, além da diminuição da qualidade do solo (CERETTA et al., 2002).

## 3.2 Rochas Basálticas

O basalto é uma rocha ígnea eruptiva, de aparência escura e de grãos finos, frequentemente afaníticas, ou seja, seus cristais não são possíveis de serem vistos a olho nu. Além disso, possui em elevada quantidade na sua composição o vidro, material amorfo (FILLA, 2011). Essas rochas são provenientes da solidificação de lava de viscosidade baixa depositada sobre a crosta terrestre e constituídas principalmente

de plagioclásio e piroxênio e, em alguns casos, de olivina. Dentre os principais minerais acessórios constituintes encontram-se os óxidos de ferro e o titânio (SIMONI; LORINI, 2011).

A textura dos basaltos pode variar de vítrea a holocristalina, sendo a mais comum a intergranular. A área de estudo dessa pesquisa está situada na região de derrames basálticos conhecida como fácies Cordilheira Alta, e seus espaços intergranulares são normalmente preenchidos por vidro intersertal com cristálitos de plagioclásio e óxidos e hidróxidos de Fe e Mn, elementos que conferem a coloração mais acentuada dessa rocha (CPRM; MINEROPAR, 2006).

A composição dos derrames varia em basalto e basalto andesítico, de acordo com as proporções de plagioclásio e piroxênio (CPRM; MINEROPAR, 2006). A Tabela 1 indica os valores médios dos elementos verificados nas fácies Cordilheira Alta os quais serão quantificados no estudo.

Tabela 1 - Teores dos elementos mapeados no derrame basáltico fácies Cordilheira Alta

Elementos	Valores médios (%)	Elementos	Valores médios (ppm)
Ca	0,294		
Fe	13,182	Cu	296,920
K	0,050		
Mg	0,254	Zn	137,844
P	0,062		

Fonte: Adaptado de CPRM e MINEROPAR (2006)

As rochas basálticas possuem determinadas propriedades que as permitem serem utilizadas como material de revestimento, por exemplo, como pisos, paredes, bancadas, pias e mesas, além de fornecer agregados para a construção civil, como a pedra britada, obtida pela moagem da rocha em mineradoras ou pedreiras (LA SERNA & REZENDE, 2012).

Na extração dessas rochas, grandes volumes de pó de rocha são gerados a partir do processo de cominuição, caracterizados pelas etapas de britagem e moagem com a redução dessas rochas a farelos, pó e filler. Esses pequenos fragmentos provenientes dessa atividade são considerados rejeitos e acarretam custos pela necessidade do seu descarte ambientalmente correto (DNPM, 2013).

Além dos benefícios mencionados anteriormente, o pó de rocha, pode ser utilizado com um remineralizador de solos a partir da lenta liberação de seus componentes mineralógicos, dessa forma, os macros e micronutrientes contidos são reservados e posteriormente disponibilizados conforme a necessidade de fertilização

do solo e das plantas. Sendo assim, esse resíduo gerado, uma alternativa ao uso de fertilizante altamente solúvel como fonte de elementos nutricionais (THEODORO, 2000).

Desde 2013, os remineralizadores são considerados insumos agrícolas pela Lei Federal nº. 12.890, sendo classificados como material proveniente de minerais e que tenha experienciado apenas a diminuição de tamanho, por processos mecânicos e que possui capacidade de alterar os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, promovendo a melhoria das propriedades físico-químicas ou da atividade biológica do solo (BRASIL, 2013).

### **3.3 Remineralizador**

A técnica de beneficiamento do solo por meio do pó de rocha, a rochagem, é caracterizada pela adição de rochas finamente cominuídas ao solo, de modo a proporcionar a remineralização atrelada a sua capacidade de disponibilizar nutrientes lentamente ao solo e posteriormente tornarem-se disponíveis para assimilação das plantas (THEODORO et al., 2012).

Essa tecnologia permite tornar a agricultura mais sustentável, por ser uma excelente alternativa ao uso dos fertilizantes convencionais muito solúveis, que degradam o ambiente, principalmente as águas de superfície e subterrâneas (THEODORO et al., 2012). Além disso, a rochagem proporciona o aproveitamento de rejeitos gerados em elevada quantidade por mineradoras e pedreiras (BERGMANN; THEODORO, 2009).

A produção total de rochas ornamentais no Brasil, em 2012 superou 5,2 milhões de toneladas (COLA; SIMÃO, 2012), sendo o pó de rocha, um resíduo proveniente dessa atividade. Dessa forma, a remineralização por meio desse material torna-se uma alternativa para a diminuição das importações de insumos para fabricação de fertilizantes convencionais, bem como aumento de produção e atrelado a redução dos custos de produção associados à necessidade de adubação, sem contar os benefícios verificados ao meio ambiente, tanto com o reaproveitamento do resíduo, como na retenção dos nutrientes do solo.

No Brasil os remineralizadores são regulamentados pela Instrução Normativa nº. 5 de 2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que estabelece as regras, classificações, tolerâncias e rotulagem para comercialização.

Segundo o MAPA (2016), os remineralizadores que utilizam exclusivamente matéria-prima de origem mineral, são classificados como da Classe “E”.

Dentre as especificações e as garantias para os remineralizadores, MAPA (2016) estabelece que a soma de bases (CaO, MgO, K<sub>2</sub>O) deve ser igual ou superior a 9%, enquanto o teor de óxido de potássio (K<sub>2</sub>O) deve ser igual ou superior a 1%. Para os elementos potencialmente tóxicos presentes, esses não devem ultrapassar os teores descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Elementos tóxicos e seu teor máximo permitido nos remineralizadores

<b>Metais</b>	<b>Teores (ppm)</b>
Arsênio (As)	15
Cádmio (Cd)	10
Mercúrio (Hg)	0,1
Chumbo (Pb)	200

Fonte: Adaptado de MAPA (2016)



## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Ponto de Amostragem**

O local escolhido para a coleta das amostras de solo cultivado, foi uma propriedade rural de base familiar, localizada no município de Marmeleiro (26°16'38.7"S; 53°05'38.9"W), região sudoeste do Paraná. Nesta, há um histórico de mais de 15 anos de adoção da prática do sistema plantio direto (SPD), e no momento da coleta, o solo estava sendo utilizado para o cultivo da soja.

A cidade está situada na região sudoeste do estado do Paraná, onde o clima da região é classificado, de acordo com Köppen, como subtropical do tipo Cfa. A precipitação média anual está contemplada entre 2.000 e 2.200 mm (NITSCHKE et al., 2019).

### **4.2 Coleta e preparo dos materiais**

#### **4.2.1 Solo**

A coleta e o preparo das amostras utilizadas seguiram as recomendações estabelecidas no Manual de Métodos de Análise de Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (2017), consistindo na coleta da camada superficial do solo, verificada entre 0 a 20 cm, com remoção do material orgânico superficial (Figura 2).

Em seguida, as amostras foram destorroadas manualmente e dispostas em lona de polipropileno para secagem ao ar (Figura 3), e por fim, reservadas para o prosseguimento do experimento.

Figura 2 - Coleta das amostras de solo.



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 3 - Secagem das amostras de solo coletadas.



Fonte: Autoria própria (2021)

Após estes procedimentos, uma pequena amostra de solo seco ao ar foi peneirada com malha de abertura de 2 mm (9 mesh), acondicionada e encaminhada para a realização das análises químicas no laboratório de solos localizado no campus da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Pato Branco/PR.

O teor de umidade do solo in natura foi estabelecido adicionando-se 20g de solo a uma placa de petri de peso conhecido e colocado, logo em seguida, em estufa a 105 °C por 24 horas, o qual foi denominado como solo seco em estufa (SSEp).

A determinação da massa de solo ( $M_s$ ) de 845,53 g, utilizada nos leitos fixos por fim, foi realizada com o preenchimento de uma coluna teste com solo seco em estufa (SSEc) e pesagem dessa quantidade de 907,62 g adicionada e, reparada por meio do fator de correção ( $f_c$ ) de 0,9316, conforme o teor de umidade calculado. A deliberação do teor de umidade e massa do solo in natura foram realizadas em triplicatas conforme as equações 1, 2, 3, 4 e 5.

$$\text{Massa solo enxuto } (P_s) = \text{massa SSEp } (g) - \text{peso placa petri } (g) \quad (1)$$

$$\text{Massa d'água } (P_a) = \text{massa solo in natura } (g) - \text{massa SSEp } (g) \quad (2)$$

$$\text{Teor de umidade } (h) = 100 \times \left( \frac{P_a}{P_s} \right) \quad (3)$$

$$\text{Fator de correção } (f_c) = \frac{100}{100 + h} \quad (4)$$

$$\text{Massa de solo } (M_s) = \text{SSEc } (g) \times f_c \quad (5)$$

Após a determinação da  $M_s$  em 845,53 g, foi adicionado ao leito fixo 50% de seu volume de água ( $V_a$ ) (Equação 14), e após 24 horas de percolação, o volume encontrado foi subtraído do volume adicionado, dessa forma sendo possível determinar a capacidade de campo ( $C_c$ ) com volume de 330 mL, segundo a metodologia exemplificada por Bamberg et al. (2011).

#### 4.2.2 Remineralizador

O remineralizador, pó de rocha, foi fornecido pela Dalba Engenharia, localizada na cidade de Francisco Beltrão - PR (26°02'40.7"S; 52°59'35.9"O), sendo a rocha de extração de origem basáltica. Para a garantia granulométrica do remineralizador (Figura 4) devido a sua natureza física, a rocha moída utilizada foi submetida a secagem em estufa (105 °C por 24 h), tendo 100% da constituição passante em peneira de 0,3 mm (ABNT 50), satisfazendo as recomendações da Instrução Normativa nº 05 (MAPA, 2016) que rege as especificações dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura.

Figura 4 - Amostra do remineralizador de basalto pronto para uso após tratamento térmico e físico.



Fonte: Autoria própria (2021)

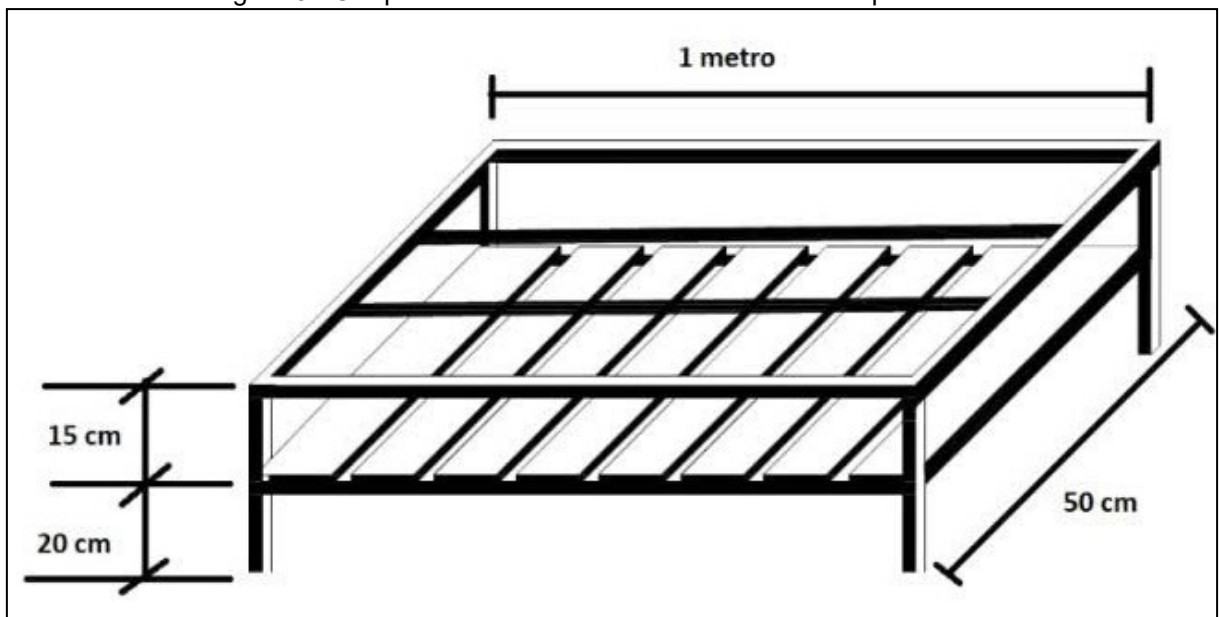
#### 4.3 Ensaio de Lixiviação

O ensaio de bancada utilizando os leitos fixos, foi adaptado segundo a metodologia exemplificada por Bamberg et al. (2011). O método descreve a construção das colunas de lixiviação e o seu preenchimento contendo a mistura do solo e o remineralizador escolhido, em diferentes proporções. O ensaio, realizado em triplicata, pressupõe a aplicação da água escolhida para a percolação através da mistura citada anteriormente. No presente trabalho, a água utilizada no ensaio foi a destilada.

#### 4.3.1 Colunas de lixiviação

Para a realização dos ensaios, foi necessário a construção de um módulo de madeira facilitando assim o manuseio, estabilidade e disposição das colunas. As especificações do módulo foram projetadas buscando o aproveitamento do espaço utilizado e estão ilustradas no croqui conforme a Figura 5, e seguidamente finalizado na Figura 6.

Figura 5 - Croqui do módulo de madeira contendo seus parâmetros



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 6 - Módulo de madeira concluído



Fonte: Autoria própria (2021)

Dessa maneira, a experiência compreendeu a concepção de 21 leitos fixos de poli cloreto de vinila (PVC) com 75 mm de diâmetro e 20 cm de altura, vedados no final com tecidos “voal” e “volta ao mundo”, e um CAP de mesmo diâmetro, de modo a evitar a passagem da mistura de solo e remineralizador no tanque de captação do lixiviador. Na Figura 7 estão demonstradas em detalhes a estruturação e identificação das colunas conforme o teor de remineralizador utilizado.

Com o propósito de simular a precipitação de forma autônoma em cada coluna, desenvolveu-se um sistema composto por um reservatório de água destilada acoplado a um gotejador irrigador, calibrado conforme a vazão necessária ao experimento.

Figura 7 - Destaque do reservatório de água destilada, leito fixo e tecido consumido



Fonte: Autoria própria (2021)

Na parte inferior do leito fixo foi utilizada uma mangueira de silicone para amparar rapidamente no recolhimento da solução lixiviada, para que pudesse ser acondicionada nos frascos Erlenmeyer.

#### 4.3.2 Determinação da quantidade de remineralizador

A quantidade de remineralizador incorporado e disposto junto ao solo acompanhou as recomendações de Bamberg et al. (2011) no qual sugerem-se valores entre 5 a 10 t ha<sup>-1</sup>, tendo em conta a aplicação em área total com incorporação na camada superficial de solo entre 0 e 20 cm, tamanho semelhante aos leitos fixos manipulados.

Isto posto, designou-se doses de 5, 6, 7, 8, 9 e 10 t ha<sup>-1</sup> para os ensaios de lixiviação, sendo codificados em E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub>, E<sub>4</sub>, E<sub>5</sub> e E<sub>6</sub> respectivamente, para facilitar o processamento de dados. Para a investigação no desempenho do experimento, recorreu-se a colunas sem adição de remineralizador denominadas controle.

Para mensurar a equivalência das doses recomendadas devido à adaptação das colunas, utilizou-se o diâmetro interno dos leitos fixos para calcular a área da seção transversal das colunas (A) na equação 6, e assim as doses proporcionais nas equações 7, 8, 9, 10, 11 e 12.

$$A = \frac{\pi \times (0,0716m)^2}{4} = 0,0040 m^2 \quad (6)$$

$$M_{E1} = \frac{5ton}{ha} \times \frac{10^6g}{ton} \times \frac{1ha}{10000 m^2} \times 0,0040m^2 = 2,01g \quad (7)$$

$$M_{E2} = \frac{6ton}{ha} \times \frac{10^6g}{ton} \times \frac{1ha}{10000 m^2} \times 0,0040m^2 = 2,42g \quad (8)$$

$$M_{E3} = \frac{7ton}{ha} \times \frac{10^6g}{ton} \times \frac{1ha}{10000 m^2} \times 0,0040m^2 = 2,82g \quad (9)$$

$$M_{E4} = \frac{8ton}{ha} \times \frac{10^6g}{ton} \times \frac{1ha}{10000 m^2} \times 0,0040m^2 = 3,22g \quad (10)$$

$$M_{E5} = \frac{9ton}{ha} \times \frac{10^6g}{ton} \times \frac{1ha}{10000 m^2} \times 0,0040m^2 = 3,62g \quad (11)$$

$$M_{E6} = \frac{10ton}{ha} \times \frac{10^6g}{ton} \times \frac{1ha}{10000 m^2} \times 0,0040m^2 = 4,03g \quad (12)$$

#### 4.3.3 Volume de água (Va) e vazão aplicado

O volume de água utilizado nos ensaios foi obtido por meio da variação entre as médias anuais de precipitação (P) e a evapotranspiração potencial (Etp) do município de estudo. Os atributos meteorológicos foram coletados segundo dados disponibilizados pelo Instituto Agrônomo do Paraná- IAPAR, entre os anos de 1974 e 2018.

A média anual de precipitação e evapotranspiração potencial para a região de estudo foram respectivamente de 2041 mm e 846 mm, portanto o volume de água percolado (Vp) calculado foi de 1195 mm ano<sup>-1</sup>.



Conforme Bamberg et al. (2011), uma frequência de lixiviações que permite a avaliação laboratorial dos nutrientes lixiviados está na ordem de 7 a 14 dias, por consequência, utilizou-se um intervalo de 7 dias.

Tendo em conta 365 dias por ano, o volume diário percolado ( $V_d$ ) estimado foi de  $3,27 \text{ mm dia}^{-1}$ , assim pressupondo a frequência de lixiviações indicada, o novo volume diário calculado foi de  $22,92 \text{ mm semana}^{-1}$ .

Para simular as lixiviações ao equivalente disponibilizado em uma condição de campo, os autores recomendam a multiplicação desse volume estipulado por um fator de aceleração do processo ( $f_a$ ) de 5 a 10 vezes. Neste sentido, foi ponderado um fator igual a oito e, uma lixiviação por semana ao longo de 07 semanas, obtendo-se um total de 07 lixiviações, correspondendo ao que poderia ser disponibilizado em 56 semanas numa condição de campo, ou seja, aproximadamente 13 meses.

Assim, o volume de água ( $V_a$ ) foi apurado conforme as equações 13 e 14, empregando a área da seção transversal da coluna, determinada na Equação (6) e a correspondência do volume de precipitação de  $1 \text{ mm ano}^{-1}$  a  $1 \text{ L m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ .

$$\text{Volume de água } (V_a) = A \text{ m}^2 \times V_p \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \cdot \text{ano}} \times \frac{1 \text{ ano}}{365 \text{ dias}} \times 7 \text{ dias} \times f_a \quad (13)$$

$$V_a = 0,0040 \text{ m}^2 \times 1195 \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \cdot \text{ano}} \times \frac{1 \text{ ano}}{365 \text{ dias}} \times 7 \text{ dias} \times 8 = 0,70 \text{ L} \quad (14)$$

A vazão seguiu a recomendação dos autores prescrita em escoamentos inferiores a  $0,5 \text{ mm min}^{-1}$ . A melhor opção detectada para atender a especificação foi o gotejador irrigador, calibrado com a assistência de um cronômetro.

#### 4.3.4 Andamento do ensaio de lixiviação

Após a montagem do módulo e execução dos cálculos necessários, foi possível prosseguir o preenchimento dos leitos fixos com a mistura de rocha moída e solo estipulado anteriormente para cada tratamento (dose) utilizado.

Para garantir a homogeneidade da mistura solo-rocha, utilizou-se uma coluna teste de mesmo diâmetro, porém com o dobro de altura e fechado nas extremidades com o auxílio do CAP. Posteriormente com muito cuidado, a mistura foi distribuída e disposta em cada coluna correspondente.

Com os leitos devidamente preenchidos, cada ensaio iniciou-se com o processo de elevação da umidificação do solo no interior das colunas até atingir a capacidade de campo ( $C_c$ ), fator estimado no item 4.1.1. Para todo início de ensaio foi necessário atingir tal condição, a Figura 8 elucida em detalhe o leito fixo contendo a mistura logo após a umidificação.

Figura 8 - Visão geral do módulo contendo os reservatórios e leitos fixos durante o experimento.



Fonte: Autoria própria (2021)

O ensaio prosseguiu com a adição do volume de água ( $V_a$ ), determinado na Equação 14, nos reservatórios localizados na parte superior das colunas. Assim, lentamente a água foi percolada através da mistura e, seu excedente, coletado e armazenado temporariamente nos frascos Erlenmeyer conforme ilustrados na Figura 9.

Figura 9 - Visão geral do módulo contendo os reservatórios e leitos fixos durante o experimento.



Fonte: Autoria própria (2021)

Posteriormente, conforme a Figura 10, a solução percolada correspondente a cada dose de remineralizador foi homogeneizada e recolhida em garrafa plástica devidamente esterilizada, beneficiando no processo de acidificação e envio das amostras para análises.

A descensão completa da água do reservatório somado a cessão do gotejamento no irrigador indicou o término de cada lixiviação realizada. O tempo médio dos ensaios, considerando a umidificação do solo, foi de 12 horas, intervalo interferido diretamente pela temperatura e umidade no momento de operação.

Figura 10 - Amostras acidificadas e prontas para análises.



Fonte: Autoria própria (2021)

#### **4.4 Análises Químicas**

##### **4.4.1 Solo**

Para a caracterização química do solo antes e após as lixiviações, as amostras foram submetidas à medição do potencial hidrogeniônico por meio de eletrodo imerso em suspensão solo: líquido ( $\text{CaCl}_2$ ), na proporção 1:2,5.

Os elementos P, K, Cu, Fe, Zn e Mn foram extraídos com a solução extratora Mehlich<sup>-1</sup> ( $\text{HCl}$  0,05 mol  $\text{L}^{-1}$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,0125 mol  $\text{L}^{-1}$ ) e, os cátions trocáveis Ca, Mg e Al determinados utilizando-se uma solução extratora KCl 1 mol  $\text{L}^{-1}$ .

A matéria orgânica foi estabelecida na digestão por via úmida da amostra com solução sulfocrômica seguido de aquecimento a uma temperatura de 150°C e posterior titulação com solução de ( $\text{Fe}^{2+}$ ).

As análises químicas foram realizadas pelo Laboratório de Química e Fertilidade do Solo (LabSolos) da UTFPR, município de Pato Branco - PR.

##### **4.4.2 Remineralizador**

A caracterização mineralógica do pó de rocha selecionado foi realizada, sobretudo por análise de difração de raios X, utilizando um Difratorômetro de Raios-X

Shimadzu, modelo XRD-7000, com movimentação do tubo e do detector de raios-X e amostra fixa na horizontal.

Assim, permitindo que os minerais fossem identificados pela caracterização de sua estrutura cristalina, resultado do processo de espalhamento de raios X pelos elétrons dos átomos do cristal, sem alteração do comprimento de onda (SILVA, 2013).

#### 4.4.3 Solução lixiviada

A solução lixiviada coletada em cada leito foi prontamente submetida à medição do potencial hidrogeniônico e assim acidificada com ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 65% até atingir pH inferior a 2, recomendação disposta pelos autores Bamberg et al. (2011), para preservação dos elementos de interesse estudado.

Os macros nutrientes P, K, Ca, Na e Mg, e os micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn, foram determinados diretamente por espectrometria de absorção atômica no Laboratório de Solos do Instituto Federal do Paraná, município de Palmas - PR.

### 4.5 Análises Estatísticas

Com o propósito de verificar a interação dos teores de remineralizador aplicado, com os elementos da solução lixiviada e solo mensurados, submeteram-se os dados apurados à análise estatística aplicando-se a análise de variância (ANOVA), e comparação entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de significância.

A normalidade e homocedasticidade dos dados foram verificadas previamente com o propósito de firmar sua representatividade. Para tal, aplicou-se respectivamente o método Shapiro Wilk com 5% de significância e, teste de Bartlett com 5% de significância.

A análise estatística foi realizada no RStudio, software ambiente de desenvolvimento integrado para R, linguagem utilizada na programação de gráficos e cálculos estatísticos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Solo

As características químicas do solo abordam fatores fundamentais para a manutenção da sua funcionalidade, conseqüentemente, a Tabela 3 ilustra diversos parâmetros para o solo antes e após o processo de remineralização e lixiviação.

Tabela 3 - Apuração das propriedades químicas do solo.

Parâmetros	Sem remineralizador	Com remineralizador
<i>M.O mg dm<sup>-3</sup></i>	38,87	30,83
<i>P mg dm<sup>-3</sup></i>	5,19	5,19
<i>K cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup></i>	0,35	0,2
<i>Cu mg dm<sup>-3</sup></i>	11,37	12,27
<i>Fe mg dm<sup>-3</sup></i>	83,99	90,34
<i>Zn mg dm<sup>-3</sup></i>	8,34	6,5
<i>Mn mg dm<sup>-3</sup></i>	363,95	283,59
<i>pH CaCl<sub>2</sub></i>	5,6	6,0
<i>Índice SMP</i>	6,3	6,3
<i>H+Al cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup></i>	3,97	3,97
<i>Ca cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup></i>	7,9	7,8
<i>Mg cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup></i>	5,9	5,6
<i>SB cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup></i>	14,15	13,6
<i>V (%)</i>	78,09	77,4
<i>CTC</i>	18,12	17,57

Fonte: Autoria própria (2022)

Para as duas situações abordadas, o teor de matéria orgânica (M.O) identificado é considerado como alto conforme as especificações tratadas por Sobral et al. (2015), e sua variação ao longo dos ensaios foi de 8,04 mg L<sup>-1</sup>.

As propriedades químicas da matéria orgânica do solo são apenas uma imagem momentânea do estado estacionário do sistema, um importante indicador das propriedades ambientais, e são de grande importância para a compreensão do equilíbrio dinâmico da matéria orgânica em sistemas abertos (NOVOTNY et al., 2022).

A adição do remineralizador proporcionou diretamente o aumento do pH, porém não os distinguiu conforme seu teor, sendo médio para as duas situações. O Alumínio trocável a um pH de cerca de 5,2 a 5,3 está praticamente insolubilizado podendo não causar mais danos as raízes das plantas, caso observado devido a saturação por bases (V%) indicar valores maiores que 70% Sobral et al. (2015), assim as cargas

provavelmente estão sendo ocupadas pelas bases trocáveis como o cálcio, o magnésio, o potássio e o sódio.

O índice SMP corrobora com valores de pH e saturação por bases (V%) , indicando um teor médio para as duas situações. Já a acidez potencial, representada por H+Al, não foi alterada e apresentou um teor médio, assim o fator consistiu na acidez trocável e não trocável do solo sendo inversamente proporcional ao índice SMP (SOBRAL et al. 2015).

Para a capacidade de troca de cátions (CTC), valores maiores do que 15 cmolc dm<sup>-3</sup> indicam presença de argila 2:1 na fração argila, e assim, para as duas condições analisadas o valor da CTC é considerado alto, tendo variação de 0.55 cmolc dm<sup>-3</sup>.

O elemento Fósforo não sofreu alterações durante o experimento, sendo seu teor considerado médio. A não alteração do teor de fósforo no solo pode ser explicada pelo teor de argila presente, visto que este elemento foi estimado pelo extrator Mehlich-1, que provavelmente foi consumido devido à facilidade do poder tampão sensível ao teor de argila, diminuindo conseqüentemente a capacidade de extrair fósforo, elemento de baixa mobilidade (SOBRAL et al. 2015).

Já o Ferro teve uma variação positiva em relação ao tempo, sua disponibilidade está altamente relacionada ao pH, M.O e Fósforo presentes no solo, já que necessita realizar o processo de redução para ser disponível as raízes das plantas, além disso, este incremento é resultado da própria lavagem das argilas, liberando o Ferro dos minerais ferromagnesianos da rocha de origem.

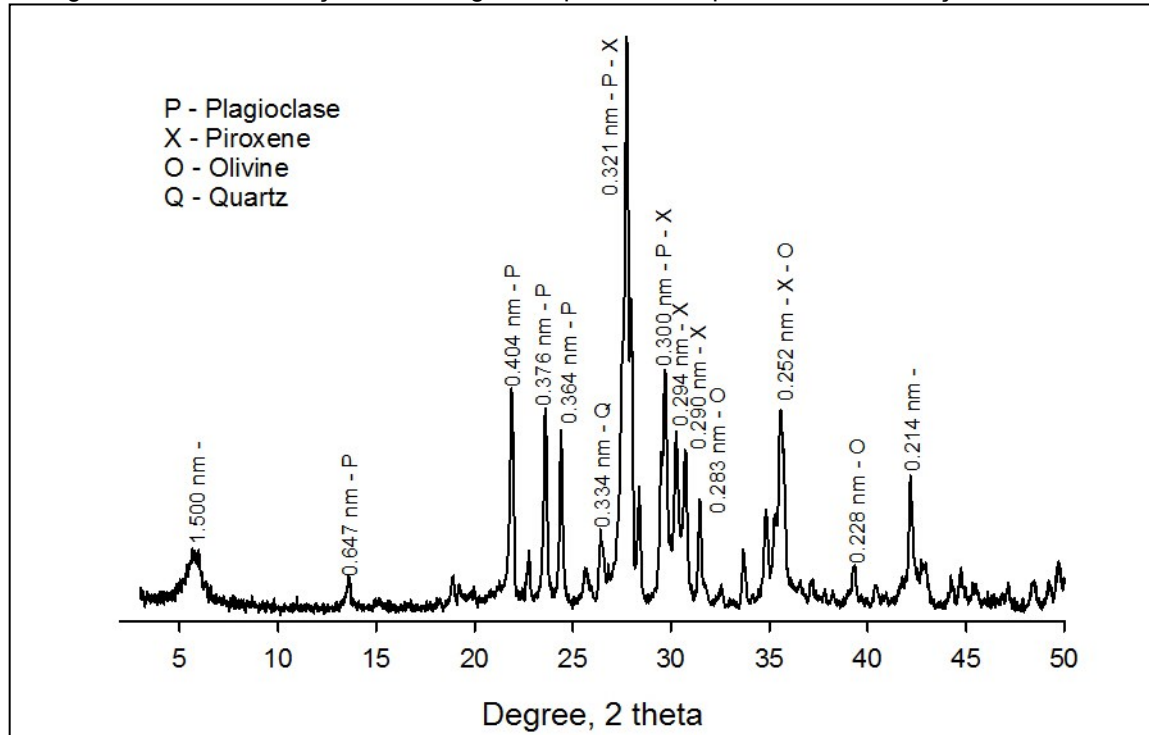
O Zinco e o Manganês para as duas situações apresentaram teores considerado altos, apesar da variação negativa ao longo do experimento, diferente do Ferro e do Cobre, que também apresentaram teores altos em ambas as ocorrências, porém a variação com o tempo foi positiva de 6,35 e 0,96 mg dm<sup>-1</sup>, respectivamente.

Estes efeitos corroboram que apesar do longo intervalo de intensas lixiviações aplicadas ao solo juntamente as suas características originárias, o mesmo foi capaz de manter os fatores em níveis adequados, expondo uma boa qualidade química do solo in natura e, possível interferência da liberação gradual dos minerais contidos no remineralizador.

## 5.2 Remineralizador

Na Figura 11 está ilustrado o efeito da difratometria de raios X realizada para a caracterização mineralógica do pó de basalto.

Figura 11 - Caracterização mineralógica do pó de rocha por análise de difração de raios X.



Fonte: Autoria própria (2021)

A área de estudo está situada na região de derrames basálticos conhecida como fácies Cordilheira Alta e seus constituintes essenciais compreendem plagioclásio e clinopiroxênio, e os acessórios, quartzo, apatita, titanita e magnetita. O espaço intergranular comumente é ocupado por vidro intersertal de plagioclásios, óxidos e hidróxidos de Fe e Mn (CPRM; MINEROPAR, 2006).

A olivina ( $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{SiO}_4$ ), é caracterizada por rochas ígneas intrusivas e invasivas, e no basalto está associada a plagioclásios, clinopiroxênios, magnetita, ilmenita e analcima, enquanto o plagioclásio ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  -  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) em seus termos intermediários apresenta tal como, o oligoclásio e a andesina.

O quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) é muito importante como formador de rochas ígneas basálticas, sendo um constituinte importante em solos e sedimentos como mineral residual, sua associação é mais comum a feldspatos potássicos e calcosódicos (LORINI; SIMONI, 2011).

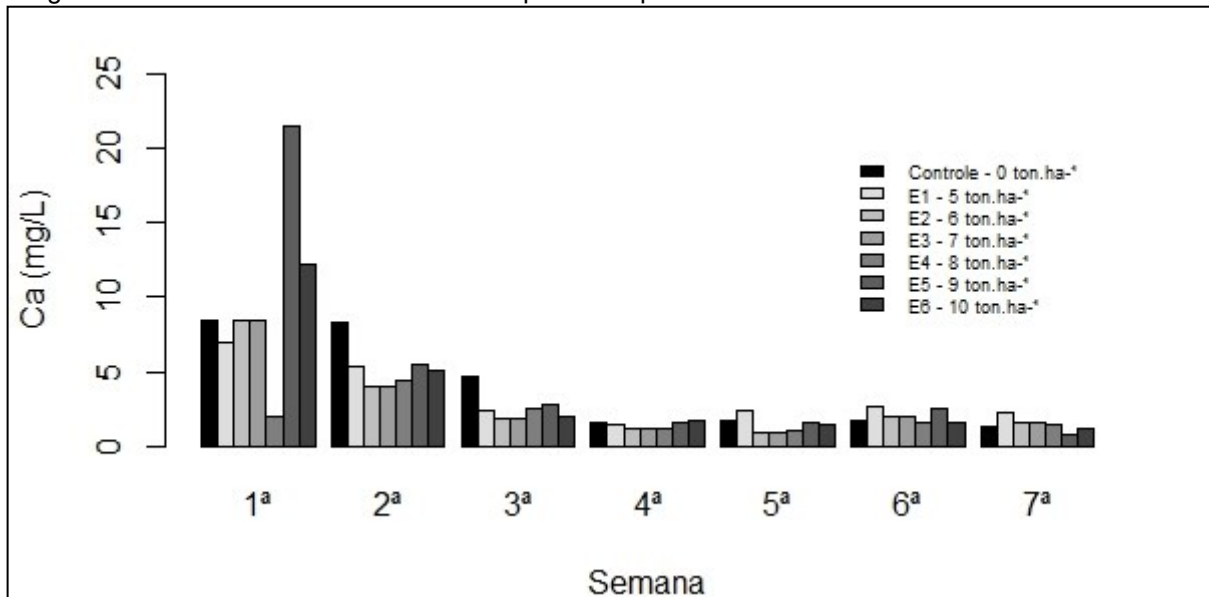


### 5.3 Macronutrientes

#### 5.3.1 Cálcio

A Figura 12 representa graficamente o acúmulo do Cálcio ao longo do experimento.

Figura 12 - Acumulado de Cálcio liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.



Fonte: Autoria própria (2022)

As tabelas 4 e 5 manifestam respectivamente os resultados obtidos após análise do lixiviado por meio da espectrometria de absorção atômica e, a análise exploratória dos dados, para o elemento Cálcio.

Tabela 4 - Quantidade de Cálcio percolado em mg L<sup>-1</sup> após os ensaios.

Semana	Tratamento						
	Controle	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1ª	8,41	6,95	8,45	8,45	1,98	21,46	12,25
2ª	8,27	5,28	4,00	4,00	4,45	5,41	5,08
3ª	4,61	2,36	1,81	1,81	2,49	2,79	1,91
4ª	1,60	1,36	1,22	1,22	1,20	1,60	1,68
5ª	1,66	2,42	0,83	0,83	1,00	1,53	1,48
6ª	1,64	2,68	1,96	1,96	1,57	2,54	1,56
7ª	1,25	2,17	1,50	1,50	1,40	0,82	1,21

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 5 - Análise exploratória dos dados para o elemento Cálcio.

<b>Tratamento</b>	<b>Médias</b>	<b>Medianas</b>	<b>Variâncias</b>	<b>Desvios</b>	<b>CV</b>
<b>Controle</b>	3.92	1.66	9.12	3.02	241.70
<b>E1</b>	3.31	2.42	4.05	2.01	60.69
<b>E2</b>	2.82	1.81	7.18	2.68	94.90
<b>E3</b>	2.82	1.81	7.18	2.68	94.90
<b>E4</b>	2.01	1.57	1.40	1.18	58.87
<b>E5</b>	5.16	2.54	53.81	7.33	142.05
<b>E6</b>	3.59	1.68	16.32	4.03	112.35

Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com as médias, apenas a dosagem E<sub>5</sub> foi capaz de superar a quantidade total lixiviada na condição sem adição de remineralizador (Controle).

Com o intuito de verificar uma possível correlação entre as doses do remineralizador utilizado e o tempo de duração das lixiviações, optou-se por seguir com a análise experimental do tipo fatorial completo, ou ANOVA fatorial.

O primeiro fator fixado (tratamento) apresenta a distinção entre o controle e respectivos tratamentos utilizados, enquanto o segundo fator (semana) foi categorizado em dois níveis, o primeiro abrange o intervalo da 1<sup>a</sup> semana a 4<sup>a</sup> semana, e o segundo, da 5<sup>a</sup> a 7<sup>a</sup> e última semana de ensaio. A tabela 6 expõe os resultados de p-valor para cada análise.

Tabela 6 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para o elemento Cálcio.

<b>E<sub>1</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>2</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>3</sub></b>	<b>p-valor</b>
semana	1.12e <sup>-13</sup>	semana	7.90e <sup>-14</sup>	semana	7.90e <sup>-14</sup>
tratamento	1.91e <sup>-10</sup>	tratamento	1.76e <sup>-11</sup>	tratamento	1.76e <sup>-11</sup>
semana:tratamento	6.92e <sup>-12</sup>	semana:tratamento	2.28e <sup>-11</sup>	semana:tratamento	2.28e <sup>-11</sup>
<b>E<sub>4</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>5</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>6</sub></b>	<b>p-valor</b>
semana	1.67e <sup>-13</sup>	semana	1.50e <sup>-14</sup>	semana	9.97e <sup>-15</sup>
tratamento	1.90e <sup>-12</sup>	tratamento	1.03e <sup>-11</sup>	tratamento	5.85e <sup>-10</sup>
semana:tratamento	2.72e <sup>-12</sup>	semana:tratamento	1.44e <sup>-11</sup>	semana:tratamento	1.98e <sup>-09</sup>

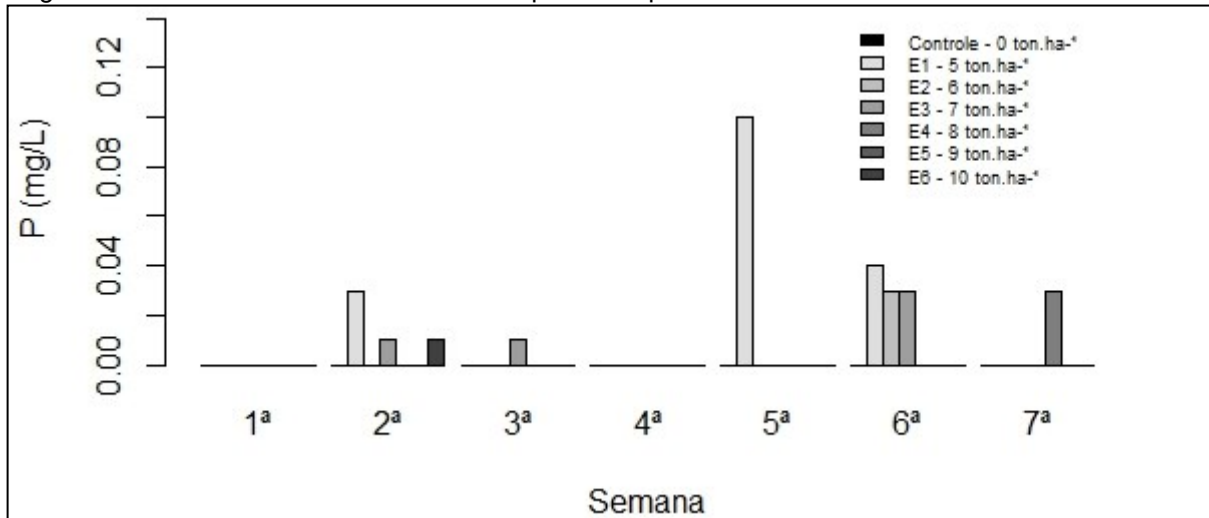
Fonte: Autoria própria (2021)

Para o Cálcio, a interação entre os fatores semana e tratamento em relação ao controle fixado mostrou-se significativo para todas as dosagens e intervalos testados, em virtude ao p-valor mensurado ser menor que 0,05. Desta maneira a concentração do remineralizador no solo e o tempo em (semanas) interferiu positivamente na liberação gradual do macronutriente Cálcio.

### 5.3.2 Fósforo

Na Figura 13 está representado graficamente o acúmulo do Fósforo ao longo do experimento.

Figura 13 - Acumulado de Fósforo liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.



Fonte: Autoria própria (2022)

As tabelas 7 e 8 representam respectivamente os resultados obtidos após análise do lixiviado por meio da espectrometria de absorção atômica e, a análise exploratória dos dados, para o macro elemento Fósforo.

Tabela 7 - Quantidade de Fósforo percolado em mg L<sup>-1</sup> após os ensaios.

Semana	Tratamento						
	Controle	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1ª	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2ª	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
3ª	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
4ª	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5ª	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6ª	0,00	0,04	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00
7ª	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 8 - Análise exploratória dos dados para o elemento Fósforo.

Tratamento	Médias	Medianas	Variâncias	Desvios	CV
Controle	0.00	0.00	0.00	0.00	-
E1	0.02	0.00	1.39 e <sup>-3</sup>	0.03	153.80
E2	0.00	0.00	1.28 e <sup>-4</sup>	0.01	264.57
E3	0.00	0.00	1.23 e <sup>-4</sup>	0.01	155.77
E4	0.00	0.00	1.28 e <sup>-4</sup>	0.01	264.57
E5	0.00	0.00	0.00	0.00	-
E6	0.00	0.00	1.42 e <sup>-5</sup>	0.00	264.57

Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com as médias, apenas a dosagem E<sub>1</sub> foi capaz de superar a quantidade total lixiviada na condição sem adição de remineralizador (Controle).

Na Tabela 9 estão expostos os resultados de p-valor para cada análise, e sua correlação entre as doses do remineralizador utilizado e o tempo de duração das lixiviações para o Fósforo.

Tabela 9 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para o elemento Fósforo.

<b>E<sub>1</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>2</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>3</sub></b>	<b>p-valor</b>
semana	9.97e <sup>-5</sup>	semana	0.007	semana	1.00
tratamento	2.26e <sup>-5</sup>	tratamento	0.007	tratamento	0.002
semana:tratamento	9.97e <sup>-5</sup>	semana:tratamento	0.007	semana:tratamento	1.00
<b>E<sub>4</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>5</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>6</sub></b>	<b>p-valor</b>
semana	0.007	semana	-	semana	0.374
tratamento	0.007	tratamento	-	tratamento	0.374
semana:tratamento	0.007	semana:tratamento	-	semana:tratamento	0.374

Fonte: Autoria própria (2021)

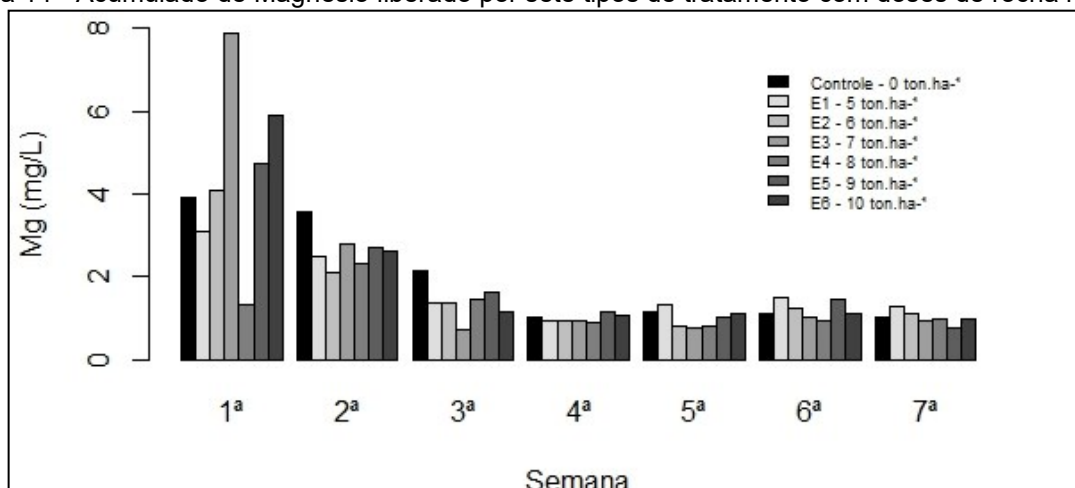
Para o Fósforo, a interação entre os fatores semana e tratamento em relação ao controle fixado mostrou-se significativo, exceto para os tratamentos E3, E5 e E6, para as dosagens e intervalos testados, em virtude ao p-valor mensurado ser menor que 0,05.

Para a dose E<sub>3</sub> o fator semana não foi significativo, assim como a interação dos fatores semana e tratamento, sendo o p-valor menor que 0,05 apenas para o fator tratamento, indicando uma correlação significativa da dose utilizada na liberação gradual desse macronutriente. Já a dose equivalente a E<sub>5</sub> e E<sub>6</sub>, não foi significativa para nenhum dos fatores.

### 5.3.3 Magnésio

Na Figura 14, estão expostos os resultados do acumulo de Magnésio ao longo do experimento.

Figura 14 - Acumulado de Magnésio liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.



Fonte: Autoria própria (2022)

As tabelas 10 e 11 manifestam, respectivamente, os resultados obtidos após análise do lixiviado por meio da espectrometria de absorção atômica e, a análise exploratória dos dados, para o elemento Magnésio.

Tabela 10 - Quantidade de Magnésio percolado em mg L<sup>-1</sup> após os ensaios.

Semana	Tratamento						
	Controle	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1 <sup>a</sup>	3,91	3,11	4,10	7,88	1,33	4,75	5,91
2 <sup>a</sup>	3,56	2,47	2,08	2,78	2,32	2,70	2,61
3 <sup>a</sup>	2,16	1,37	1,37	0,70	1,46	1,63	1,16
4 <sup>a</sup>	1,01	0,94	0,94	0,93	0,90	1,15	1,06
5 <sup>a</sup>	1,14	1,31	0,82	0,76	0,81	1,00	1,10
6 <sup>a</sup>	1,11	1,50	1,23	1,01	0,95	1,47	1,09
7 <sup>a</sup>	1,01	1,26	1,12	0,91	0,98	0,76	0,98

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 11 - Análise exploratória dos dados para o elemento Magnésio.

Tratamento	Médias	Medianas	Variâncias	Desvios	CV
Controle	1.98	1.14	1.40	1.18	30.31
E1	1.70	1.37	0.60	0.78	45.66
E2	1.66	1.23	1.31	1.14	68.94
E3	2.13	0.93	6.93	2.63	123.10
E4	1.25	0.98	0.27	0.52	42.72
E5	1.92	1.47	1.94	1.39	72.58
E6	1.98	1.10	3.32	1.82	91.70

Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com as médias, apenas a dosagem E<sub>3</sub> foi capaz de superar a quantidade total lixiviada na condição sem adição de remineralizador (Controle).

A tabela 12 expõe os resultados de p-valor para cada análise, e sua correlação entre as doses do remineralizador utilizado e o tempo de duração das lixiviações para o macro elemento Magnésio.

Tabela 12 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para o elemento Magnésio.

E <sub>1</sub>	p-valor	E <sub>2</sub>	p-valor	E <sub>3</sub>	p-valor
semana	3.84e <sup>-12</sup>	semana	2.32e <sup>-12</sup>	semana	7.22e <sup>-13</sup>
tratamento	4.24e <sup>-9</sup>	tratamento	2.30e <sup>-9</sup>	tratamento	4.41e <sup>-8</sup>
semana:tratamento	3.82e <sup>-10</sup>	semana:tratamento	3.46e <sup>-9</sup>	semana:tratamento	2.30e <sup>-9</sup>
E <sub>4</sub>	p-valor	E <sub>5</sub>	p-valor	E <sub>6</sub>	p-valor
semana	4.72e <sup>-12</sup>	semana	3.53e <sup>-3</sup>	semana	9.97e <sup>-12</sup>
tratamento	8.46e <sup>-11</sup>	tratamento	3.65e <sup>-7</sup>	tratamento	0.007
semana:tratamento	2.12e <sup>-10</sup>	semana:tratamento	8.91e <sup>-7</sup>	semana:tratamento	0.000

Fonte: Autoria própria (2021)

Para o Magnésio, a interação entre os fatores semana e tratamento em relação ao controle fixado mostrou-se significativo para todas as dosagens e intervalos testados, em virtude ao p-valor mensurado ser menor que 0,05.

### 5.3.4 Potássio

Os resultados obtidos após análise do lixiviado por meio da espectrometria de absorção atômica e, as análises exploratórias dos dados estão expressas nas tabelas 13 e 14, para o elemento Potássio.

Tabela 13 - Quantidade de Potássio percolado em mg L<sup>-1</sup> após os ensaios.

Semana	Tratamento						
	Controle	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1 <sup>a</sup>	2,40	1,60	2,50	3,70	21,00	5,00	4,50
2 <sup>a</sup>	19,60	12,30	1,00	1,20	0,80	1,20	2,10
3 <sup>a</sup>	1,00	0,80	1,20	0,60	1,00	1,30	1,20
4 <sup>a</sup>	1,60	0,50	0,90	0,80	0,80	1,00	1,10
5 <sup>a</sup>	1,10	0,70	0,80	0,70	0,70	0,90	1,20
6 <sup>a</sup>	1,40	1,70	1,00	2,80	0,90	1,20	1,10
7 <sup>a</sup>	1,00	0,70	0,90	0,90	1,40	1,00	1,00

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 14 - Análise exploratória dos dados para o elemento Potássio.

Tratamento	Médias	Medianas	Variâncias	Desvios	CV
Controle	4.01	1.40	41.68	6.45	32.94
E1	2.61	0.80	18.46	4.29	164.35
E2	1.18	1.00	0.35	0.59	49.99
E3	1.52	0.90	1.48	1.21	79.74
E4	3.80	0.90	57.57	7.58	199.68
E5	1.65	1.20	2.19	1.48	89.36
E6	1.74	1.20	1.61	1.27	72.94

Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com as médias, nenhuma dosagem foi capaz de superar a quantidade total lixiviada na condição sem adição de remineralizador (Controle).

A tabela 15 expõe os resultados de p-valor para cada análise, e sua correlação entre as doses do remineralizador utilizado e o tempo de duração das lixiviações para o macro elemento Potássio.

Tabela 15 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para o elemento Potássio.

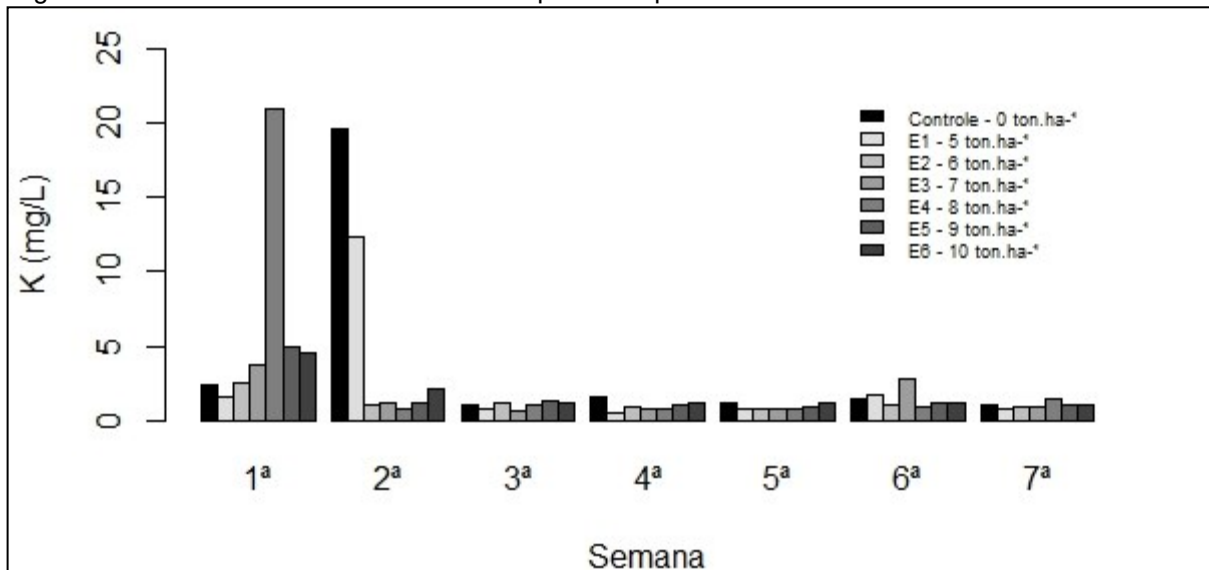
E <sub>1</sub>	p-valor	E <sub>2</sub>	p-valor	E <sub>3</sub>	p-valor
semana	4.94e <sup>-14</sup>	semana	1.81e <sup>-13</sup>	semana	2.14e <sup>-13</sup>
tratamento	6.50e <sup>-12</sup>	tratamento	3.90e <sup>-13</sup>	tratamento	6.55e <sup>-13</sup>
semana:tratamento	9.14e <sup>-12</sup>	semana:tratamento	5.47e <sup>-13</sup>	semana:tratamento	4.42e <sup>-13</sup>
E <sub>4</sub>	p-valor	E <sub>5</sub>	p-valor	E <sub>6</sub>	p-valor
semana	1.98 e <sup>-14</sup>	semana	1.22e <sup>-13</sup>	semana	1.18e <sup>-13</sup>
tratamento	1.18e <sup>-8</sup>	tratamento	8.09e <sup>-13</sup>	tratamento	9.39e <sup>-13</sup>
semana:tratamento	9.57e <sup>-7</sup>	semana:tratamento	9.88e <sup>-13</sup>	semana:tratamento	1.04e <sup>-12</sup>

Fonte: Autoria própria (2021)

Para o Potássio, a interação entre os fatores semana e tratamento em relação ao controle fixado mostrou-se significativo para todas as dosagens e intervalos testados, em virtude ao p-valor mensurado ser menor que 0,05. Desta maneira a concentração do remineralizador no solo e o tempo em (semanas) interferiu positivamente na liberação gradual desse macronutriente.

A Figura 15 representa graficamente o acúmulo do Potássio ao longo do experimento.

Figura 15 - Acumulado de Potássio liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.



Fonte: Autoria própria (2022)

### 5.3.5 Sódio

Os resultados obtidos após análise do lixiviado por meio da espectrometria de absorção atômica e, as análises exploratórias dos dados, para o elemento Sódio, estão estampadas nas tabelas 16 e 17.

Tabela 16 - Quantidade de Sódio percolado em mg L<sup>-1</sup> após os ensaios.

Semana	Tratamento						
	Controle	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1ª	2,60	2,60	4,40	5,80	4,40	5,40	3,50
2ª	5,80	3,80	2,70	1,10	0,90	1,10	8,50
3ª	2,90	0,50	1,30	0,70	0,80	0,80	3,30
4ª	3,80	1,20	1,30	3,30	0,80	0,70	3,40
5ª	3,90	1,90	3,20	3,70	0,90	1,00	4,70
6ª	2,50	2,80	2,40	3,10	1,60	1,70	3,10
7ª	2,30	2,80	2,20	3,70	1,90	1,50	3,10

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 17 - Análise exploratória dos dados para o elemento Sódio.

<b>Tratamento</b>	<b>Médias</b>	<b>Medianas</b>	<b>Variâncias</b>	<b>Desvios</b>	<b>CV</b>
<b>Controle</b>	3.40	2.90	1.30	1.14	33.63
<b>E1</b>	2.22	2.60	1.11	1.05	47.32
<b>E2</b>	2.50	2.40	1.06	1.03	41.33
<b>E3</b>	3.05	3.30	2.66	1.63	53.44
<b>E4</b>	1.61	0.90	1.52	1.23	76.58
<b>E5</b>	1.74	1.10	2.45	1.56	89.92
<b>E6</b>	4.22	3.40	3.46	1.86	44.01

Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com as médias, apenas a dosagem E<sub>6</sub> foi capaz de superar a quantidade total lixiviada na condição sem adição de remineralizador (Controle).

A tabela 18 expõe os resultados de p-valor para cada análise, e sua correlação entre as doses do remineralizador utilizado e o tempo de duração das lixiviações para o macro elemento Sódio.

Tabela 18 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para o elemento Sódio.

<b>E<sub>1</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>2</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>3</sub></b>	<b>p-valor</b>
semana	2.50e <sup>-11</sup>	semana	1.26e <sup>-11</sup>	semana	2.81e <sup>-11</sup>
tratamento	1.33e <sup>-11</sup>	tratamento	3.81e <sup>-11</sup>	tratamento	1.81e <sup>-9</sup>
semana:tratamento	5.30e <sup>-11</sup>	semana:tratamento	1.46e <sup>-10</sup>	semana:tratamento	4.63e <sup>-11</sup>
<b>E<sub>4</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>5</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>6</sub></b>	<b>p-valor</b>
semana	9.56e <sup>-12</sup>	semana	5.54e <sup>-12</sup>	semana	1.48e <sup>-12</sup>
tratamento	2.46e <sup>-12</sup>	tratamento	3.31e <sup>-12</sup>	tratamento	5.30e <sup>-11</sup>
semana:tratamento	2.59e <sup>-10</sup>	semana:tratamento	1.31e <sup>-9</sup>	semana:tratamento	1.56e <sup>-8</sup>

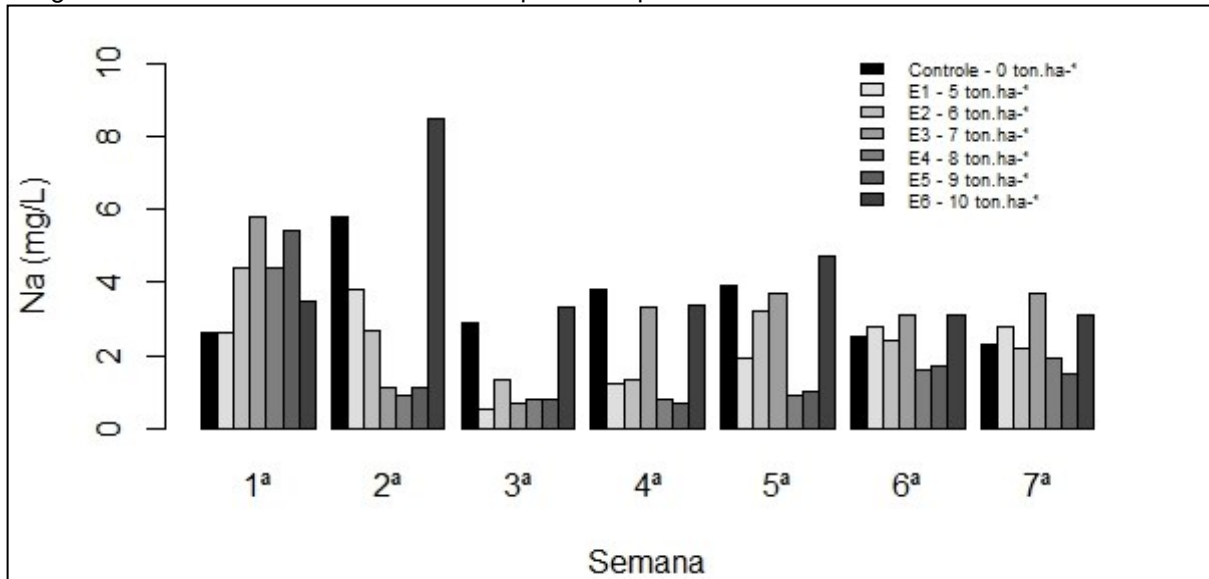
Fonte: Autoria própria (2021)

Para o Sódio, a interação entre os fatores semana e tratamento em relação ao controle fixado mostrou-se significativo para todas as dosagens e intervalos testados, em virtude ao p-valor mensurado ser menor que 0,05. Desta maneira a concentração do remineralizador no solo e o tempo em (semanas) interferiu positivamente na liberação gradual desse macronutriente.

A Figura 16 representa graficamente o acúmulo do Sódio ao longo do experimento.



Figura 16 - Acumulado de Sódio liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.



Fonte: Autoria própria (2022)

## 5.4 Micronutrientes

### 5.4.1 Cobre

Os resultados obtidos após análise do lixiviado por meio da espectrometria de absorção atômica e, as análises exploratórias dos dados, para o micro elemento Cobre, estão estampadas nas tabelas 19 e 20.

Tabela 19 - Quantia de Cobre percolado em mg L<sup>-1</sup> após os ensaios.

Semana	Tratamento						
	Controle	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1ª	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2ª	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3ª	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4ª	0,00	0,00	0,00	1,36	0,00	0,00	0,00
5ª	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6ª	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,00
7ª	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 20 - Análise exploratória dos dados para o elemento Cobre.

Tratamento	Médias	Medianas	Variâncias	Desvios	CV
Controle	0.00	0.00	0.00	0.00	-
E1	0.00	0.00	0.00	0.00	-
E2	0.00	0.00	0.00	0.00	-
E3	0.19	0.00	0.26	0.51	264.57
E4	0.00	0.00	0.00	0.00	-
E5	0.03	0.00	0.00	0.09	264.57
E6	0.00	0.00	0.00	0.00	-

Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com as médias, apenas as dosagens E<sub>3</sub> e E<sub>5</sub> foram capazes de superar a quantidade total lixiviada na condição sem adição de remineralizador (Controle).

A Tabela 21 expõe os resultados de p-valor para cada análise, e sua correlação entre as doses do remineralizador utilizado e o tempo de duração das lixiviações para o micro elemento Cobre.

Tabela 21 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para o elemento Cobre.

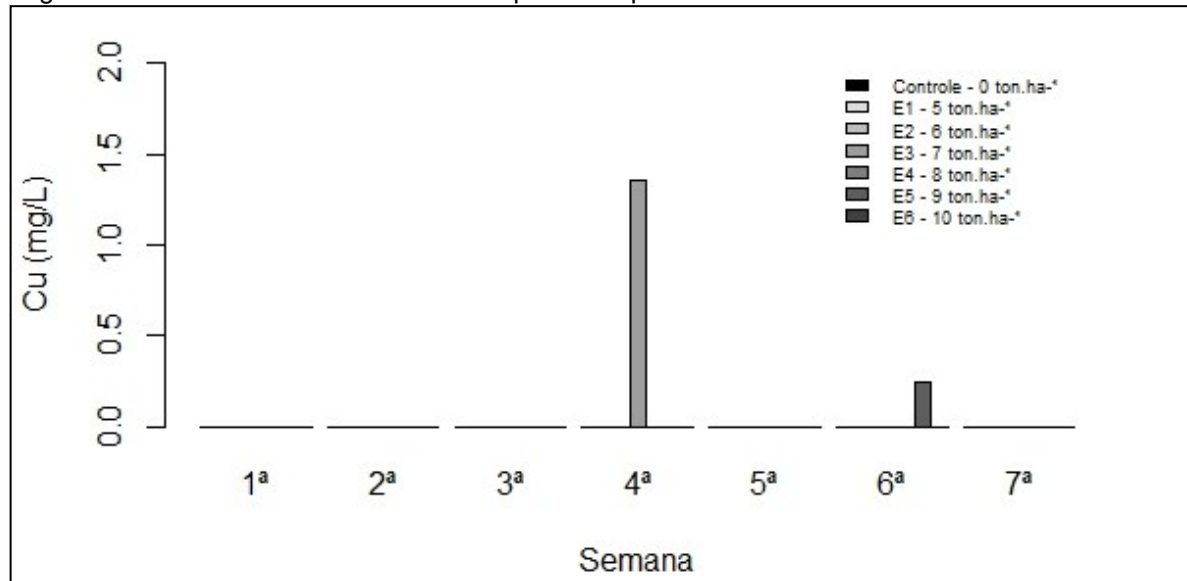
E <sub>1</sub>	p-valor	E <sub>2</sub>	p-valor	E <sub>3</sub>	p-valor
semana	-	semana	-	semana	1.11e <sup>-9</sup>
tratamento	-	tratamento	-	tratamento	1.11e <sup>-9</sup>
semana:tratamento	-	semana:tratamento	-	semana:tratamento	1.11e <sup>-9</sup>
E <sub>4</sub>	p-valor	E <sub>5</sub>	p-valor	E <sub>6</sub>	p-valor
semana	-	semana	1.23e <sup>-6</sup>	semana	-
tratamento	-	tratamento	1.23e <sup>-6</sup>	tratamento	-
semana:tratamento	-	semana:tratamento	1.23e <sup>-6</sup>	semana:tratamento	-

Fonte: Autoria própria (2021)

Para o Cobre, a interação entre os fatores semana e tratamento em relação ao controle fixado foi significativo apenas para as dosagens E<sub>3</sub> e E<sub>5</sub>, em virtude ao p-valor mensurado ser menor que 0,05.

A Figura 17 representa graficamente o acúmulo do Cobre ao longo do experimento.

Figura 17 - Acumulado de Cobre liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.



Fonte: Autoria própria (2022)

### 5.4.2 Ferro

Os resultados obtidos após análise do lixiviado por meio da espectrometria de absorção atômica e, as análises exploratórias dos dados, para o micro elemento Ferro, estão estampadas nas Tabelas 22 e 23.

Tabela 22 - Quantidade de Ferro percolado em mg L<sup>-1</sup> após os ensaios.

Semana	Tratamento						
	Controle	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1 <sup>a</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 <sup>a</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3 <sup>a</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 <sup>a</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5 <sup>a</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6 <sup>a</sup>	0,55	0,73	0,69	1,09	2,85	0,89	1,20
7 <sup>a</sup>	0,31	0,36	0,62	0,93	0,84	1,44	1,50

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 23 - Análise exploratória dos dados para o elemento Ferro.

Tratamento	Médias	Medianas	Variâncias	Desvios	CV
Controle	0.12	0.00	0.04	0.20	168.52
E1	0.15	0.00	0.08	0.28	184.04
E2	0.18	0.00	0.10	0.32	171.12
E3	0.28	0.00	0.24	0.49	171.53
E4	0.52	0.00	1.14	1.07	203.18
E5	0.33	0.00	0.34	0.59	177.31
E6	0.38	0.00	0.44	0.66	172.25

Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com as médias, todas as dosagens foram capazes de superar a quantidade total lixiviada na condição sem adição de remineralizador (Controle).

A Tabela 24 expõe os resultados de p-valor para cada análise, e sua correlação entre as doses do remineralizador utilizado e o tempo de duração das lixiviações para o micro elemento Ferro.

Tabela 24 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para o elemento Ferro.

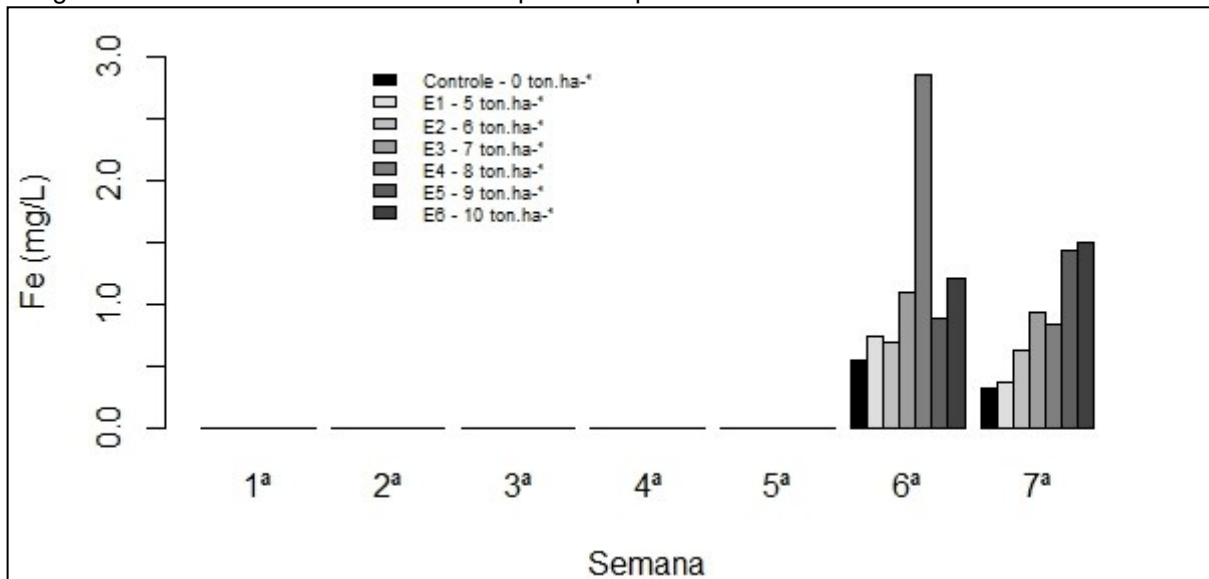
E <sub>1</sub>	p-valor	E <sub>2</sub>	p-valor	E <sub>3</sub>	p-valor
semana	1.06e <sup>-9</sup>	semana	6.89e <sup>-10</sup>	semana	2.18e <sup>-10</sup>
tratamento	5.33e <sup>-6</sup>	tratamento	3.65e <sup>-7</sup>	tratamento	8.00e <sup>-9</sup>
semana:tratamento	5.33e <sup>-6</sup>	semana:tratamento	3.65e <sup>-7</sup>	semana:tratamento	8.00e <sup>-9</sup>
E <sub>4</sub>	p-valor	E <sub>5</sub>	p-valor	E <sub>6</sub>	p-valor
semana	3.53e <sup>-11</sup>	semana	1.47e <sup>-10</sup>	semana	9.44e <sup>-11</sup>
tratamento	2.34e <sup>-10</sup>	tratamento	3.21e <sup>-9</sup>	tratamento	1.31e <sup>-9</sup>
semana:tratamento	2.34e <sup>-10</sup>	semana:tratamento	3.21e <sup>-9</sup>	semana:tratamento	1.31e <sup>-9</sup>

Fonte: Autoria própria (2021)

Para o Ferro, a interação entre os fatores semana e tratamento em relação ao controle fixado mostrou-se significativo para todas as dosagens e intervalos testados, em virtude ao p-valor mensurado ser menor que 0,05. Desta maneira a concentração do remineralizador no solo e o tempo em (semanas) interferiu positivamente na liberação gradual desse macronutriente.

A Figura 18 representa graficamente o acúmulo do Ferro ao longo do experimento.

Figura 18 - Acumulado de Ferro liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.



Fonte: Autoria própria (2022)

#### 5.4.3 Manganês

Os resultados obtidos após análise do lixiviado por meio da espectrometria de absorção atômica e, as análises exploratórias dos dados, para o micro elemento Manganês, estão estampadas nas Tabelas 25 e 26.

Tabela 25 - Quantidade de Manganês percolado em mg L<sup>-1</sup> após os ensaios.

Semana	Tratamento						
	Controle	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1ª	0,01	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02
2ª	0,02	0,04	0,02	0,01	0,04	0,03	0,01
3ª	0,02	0,43	0,02	0,01	0,03	0,03	0,03
4ª	0,03	0,03	0,04	0,04	0,02	0,02	0,03
5ª	0,03	0,03	0,01	0,04	0,04	0,03	0,03
6ª	0,04	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04
7ª	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,04

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 26 - Análise exploratória dos dados para o elemento Manganês.

<b>Tratamento</b>	<b>Médias</b>	<b>Medianas</b>	<b>Variâncias</b>	<b>Desvios</b>	<b>CV</b>
<b>Controle</b>	0.02	0.03	8.36	0.01	35.56
<b>E1</b>	0.09	0.04	2.23	0.14	163.38
<b>E2</b>	0.02	0.02	9.04	0.00	41.61
<b>E3</b>	0.02	0.03	2.47	0.01	55.07
<b>E4</b>	0.03	0.03	6.66	0.00	27.21
<b>E5</b>	0.02	0.03	2.38	0.00	17.97
<b>E6</b>	0.02	0.03	1.14	0.01	37.41

Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com as médias, apenas as dosagens E<sub>1</sub> e E<sub>4</sub> foram capazes de superar a quantidade total lixiviada na condição sem adição de remineralizador (Controle).

A Tabela 27 expõe os resultados de p-valor para cada análise, e sua correlação entre as doses do remineralizador utilizado e o tempo de duração das lixiviações para o micro elemento Manganês.

Tabela 27 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para o elemento Manganês.

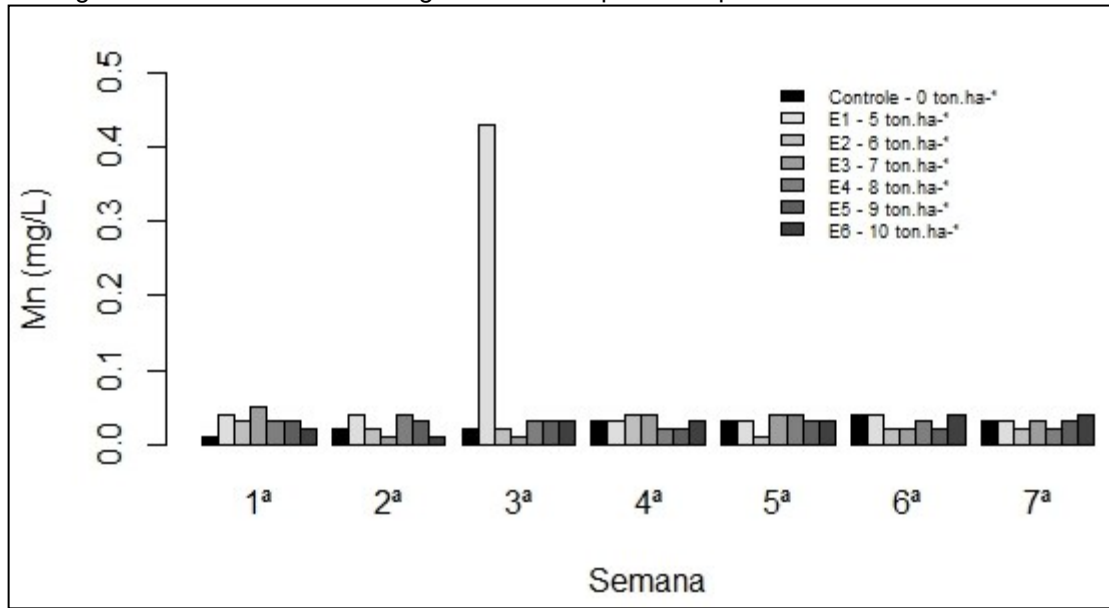
<b>E<sub>1</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>2</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>3</sub></b>	<b>p-valor</b>
semana	1.46e <sup>-6</sup>	semana	0.002	semana	0.11
tratamento	1.75e <sup>-6</sup>	tratamento	0.030	tratamento	1.00
semana:tratamento	1.46e <sup>-6</sup>	semana:tratamento	0.002	semana:tratamento	0.11
<b>E<sub>4</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>5</sub></b>	<b>p-valor</b>	<b>E<sub>6</sub></b>	<b>p-valor</b>
semana	0.039	semana	0.039	semana	1.00
tratamento	0.373	tratamento	0.373	tratamento	1.00
semana:tratamento	0.039	semana:tratamento	0.039	semana:tratamento	1.00

Fonte: Autoria própria (2021)

Para o Manganês, a interação entre os fatores semana e tratamento em relação ao controle fixado mostrou-se significativo para as dosagens E<sub>1</sub> e E<sub>2</sub>, em virtude ao p-valor mensurado ser menor que 0,05.

Para as dosagens E<sub>4</sub> e E<sub>5</sub>, apenas o fator tratamento não se mostrou significativo, enquanto para as dosagens E<sub>3</sub> e E<sub>6</sub>, nenhum fator foi significativo. A Figura 19 representa graficamente o acúmulo do Manganês ao longo do experimento.

Figura 19 - Acumulado de Manganês liberado por sete tipos de doses de rocha moída



Fonte: Autoria própria (2022)

#### 5.4.4 Zinco

Os resultados obtidos após análise do lixiviado por meio da espectrometria de absorção atômica e, as análises exploratórias dos dados, para o micro elemento Zinco, estão estampadas nas Tabelas 28 e 29.

Tabela 28 - Quantidade de Zinco percolado em mg L<sup>-1</sup> após os ensaios.

Semana	Tratamento						
	Controle	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1ª	0,00	0,08	0,76	0,45	0,00	0,00	0,00
2ª	0,00	0,20	0,07	0,19	0,23	0,00	0,00
3ª	0,00	0,00	0,20	0,92	0,00	0,00	0,00
4ª	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5ª	0,00	0,00	0,21	0,00	0,07	0,00	0,00
6ª	0,03	0,00	0,28	0,00	0,00	0,08	0,05
7ª	0,00	0,00	0,04	0,07	0,54	0,00	0,00

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 29 - Análise exploratória dos dados para o elemento Zinco.

Tratamento	Médias	Medianas	Variâncias	Desvios	CV
Controle	0.01	0.00	0.00	0.01	164.45
E1	0.04	0.04	0.00	0.07	191.48
E2	0.22	0.02	0.06	0.25	115.70
E3	0.23	0.03	0.11	0.34	147.76
E4	0.12	0.03	0.04	0.20	169.62
E5	0.01	0.03	0.00	0.03	264.57
E6	0.00	0.03	0.00	0.01	264.57

Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com as médias, apenas as dosagens E<sub>5</sub> e E<sub>6</sub> não foram capazes de superar a quantidade total lixiviada na condição sem adição de remineralizador (Controle).

A Tabela 30 expõe os resultados de p-valor para cada análise, e sua correlação entre as doses do remineralizador utilizado e o tempo de duração das lixiviações para o micro elemento Zinco.

Tabela 30 - ANOVA fatorial com nível de significância de 5% para o elemento Zinco.

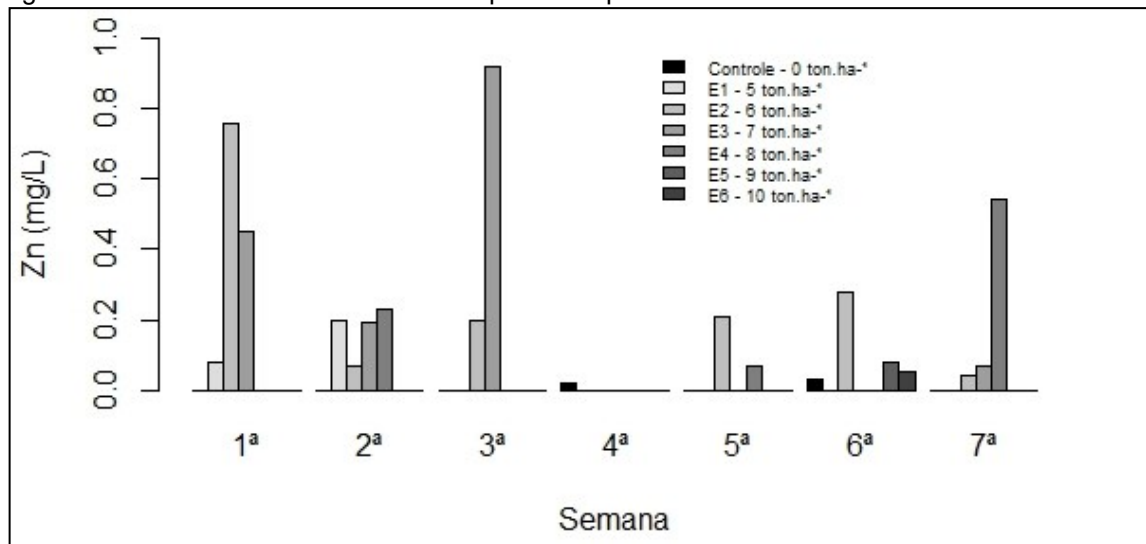
E <sub>1</sub>		E <sub>2</sub>		E <sub>3</sub>	
	p-valor		p-valor		p-valor
semana	6.80e <sup>-6</sup>	semana	9.57e <sup>-7</sup>	semana	1.25e <sup>-8</sup>
tratamento	1.10e <sup>-5</sup>	tratamento	1.18e <sup>-8</sup>	tratamento	9.63e <sup>-9</sup>
semana:tratamento	5.08e <sup>-6</sup>	semana:tratamento	8.19e <sup>-7</sup>	semana:tratamento	1.18e <sup>-8</sup>
E <sub>4</sub>		E <sub>5</sub>		E <sub>6</sub>	
	p-valor		p-valor		p-valor
semana	2.58e <sup>-6</sup>	semana	0.000	semana	0.003
tratamento	1.54e <sup>-7</sup>	tratamento	0.015	tratamento	0.594
semana:tratamento	3.19e <sup>-6</sup>	semana:tratamento	0.001	semana:tratamento	0.015

Fonte: Autoria própria (2021)

Para o Zinco, apenas a interação do fator tratamento não foi significativo para a dosagem E<sub>6</sub>, devido ao p-valor ser maior que 0,05.

A Figura 20 representa graficamente o acúmulo do Zinco ao longo do experimento.

Figura 20 - Acumulado de Zinco liberado por sete tipos de tratamento com doses de rocha moída.



Fonte: Autoria própria (2022)

## 6 CONCLUSÃO

O aproveitamento das características minerais contidas nas rochas basálticas por meio da remineralização é uma técnica viável, onde o solo torna-se apto a adquirir de forma gradual os macros e micronutrientes perdidos pelos diversos tipos de intervenção.

Com a estratégia de uso dos leitos fixo, foi possível investigar deliberadamente em escala laboratorial a dinâmica de percolação dos nutrientes estudados em relação às doses de remineralizador aplicada, além de verificar ao longo das semanas tais lixiviações.

Em relação às doses empregadas, foi possível destacar os tratamentos E<sub>1</sub> e E<sub>3</sub>, equivalentes a 5 e 7 ton ha<sup>-1</sup>, respectivamente, devido ao fato de serem apontados como contribuintes para elevação dos teores de pelo menos 4 nutrientes, fósforo, o magnésio, o cobre, o ferro, o manganês, e o zinco, seguidos pelos tratamentos E<sub>4</sub> e E<sub>5</sub>, equivalentes a 8 e 9 ton ha<sup>-1</sup>, que contribuíram para o acréscimo dos teores de cálcio, cobre, ferro, manganês e zinco.

Distintas observações foram notadas quanto aos nutrientes, apenas o Ferro teve seu teor ampliado por todos os tipos de doses implementadas, ao contrário do Potássio que não obteve mudanças em seu teor em nenhum tipo de tratamento aplicado.

Já em relação aos macros e micronutrientes, foi possível constatar que para cada micronutriente pelo menos dois tratamentos satisfizeram a elevação dos seus teores, enquanto para os macronutrientes, apenas um ou nenhum tratamento foi necessário para alcançar tal feito.

Sendo assim, a rochagem é opção exequível pela sua capacidade de proporcionar a remineralização do solo disponibilizando nutrientes lentamente, e os tornando disponíveis para assimilação das plantas.



## REFERÊNCIAS

AZEVEDO, A.C.; KAMINSKI, J. **Considerações sobre os solos dos campos de areia do Rio Grande do Sul.** Ciência e Ambiente, v.1, p.65-70, 1995.

BAMBERG, A.L. et al. **Dinâmica de liberação de nutrientes disponibilizados por rochas moídas em colunas de lixiviação.** 2011. In: XXXII anais do congresso brasileiro de ciência do solo, Uberlândia, MG. Disponível em: &lt;  
<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/950256/1/2AGBamberg.pdf> &gt;;  
Acesso em: 15 ago. 2018.

BERGMANN, M. F. THEODORO, S. M. de C. H. **Rochagem Viabilizando o uso sustentável dos descartes de mineração no Distrito mineiro de Ametista do Sul (DMAS), RS, BRASIL.** In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM: Rochagem e fertilidade do solo, 2009, Brasília. Anais. Brasília – DF: Embrapa Cerrados, 2010, p 137-145.

BERTONCINI, E.I.; MATTIAZZO, M.E. **Mobilidade de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.23, p.737-744, 1999. Disponível em: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGB.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=181523>. Acesso em: 30 out. 2019.

BLAINSKI, E. et al. **Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo a penetração.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.32, p.975-983, 2008. Disponível em:  
<https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/8346/texto%20completo.pdf?sequence=1>. Acesso em: 16 set. 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013.** Altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências. Brasília: Casa Civil, [2013]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2013/Lei/L12890.htm#art2](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2013/Lei/L12890.htm#art2). Acesso em: 8 nov. 2019.

BONINI, C. S. B., & Alves, M. C. (n.d.). **Qualidade física de um Latossolo Vermelho em recuperação há dezessete anos.** Disponível em:  
<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/vWYdyF34ZrRNnFWSwj4gqHw/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 30 out. 2019.

CAIXETA, K. F. et al. **Perda de nutrientes por lixiviação em Latossolo cultivado com diferentes híbridos de meloeiro sob ambiente protegido.** XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Natal -RN, p. 1-2, 2015. Disponível em:  
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/135299/1/Karoline-et-al.-FINAL-Congre35solo.pdf>. Acesso em: 24 out. 2019.

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM (RJ). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2010. 380 p. ISBN 978-85-61121-61-7. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/agrominerais/novolivro/cap6.pdf>. Acesso em: 16 set. 2019.

CERETTA, C.A. et al. **Produção e decomposição de fitomassa de plantas invernais de cobertura de solo e milho, sob diferentes manejos da adubação nitrogenada**. Ciência Rural, v.32, p.49-54, 2002.

COLA, G. P. A.; SIMÃO, J. B. P. **Rochagem como forma alternativa de suplementação de Potássio na agricultura agroecológica**. REVISTA VERDE DE AGROECOLOGIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, Mossoró - RN, v. 7, ed. 1, p. 01 - 08, 2012. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/viewFile/1132/1269>. Acesso em: 8 nov. 2019.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM; SERVIÇO GEOLÓGICO DO PARANÁ – MINEROPAR. **Geologia e recursos minerais do Sudoeste do Estado do Paraná**. Brasília: CPRM, 2006. 95 p. Disponível em: <<http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=126>>. Acesso em: 28 ago. 2019

D'ANTONIO, C.; MEYERSON, L.A. **Exotic plant species as problems and solutions in ecological restoration: a synthesis**. Restoration Ecology, Tucson, v.10, n.4, p.703-713, 2002. Disponível em: <<http://www3.interscience.wiley.com/journal/118959562>>. Acesso em: 15 abr. 2006. doi: 10.1046/j.1526-100X.2002.01051.x. Acesso em: 4 nov. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. Sumário **Mineral**. Brasília, 2013. 137 p. ISBN 0101 2053. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2013>. Acesso em: 25 set. 2019

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Fundamentos e aplicações da modelagem ambiental de agrotóxicos**. 1. ed. Campinas - SP: [s. n.], 2010. 46 p. ISBN 0103-78110. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/884921/1/GEBLERDoc782010.pdf>. Acesso em: 22 set. 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Brasília-DF. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e aum. [S. l.: s. n.], 2017. 573 p. ISBN 978-85-7035-771-7. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1085209>. Acesso em: 10 set. 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e aum. Brasília - DF: [s. n.], 2018. 187 p. ISBN 978-85-7035-817-2. E-book.

FARIAS, L. N. et al. **Características morfológicas e produtivas de feijão guandu anão cultivado em solo compactado**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e

Ambiental, Campina Grande, 2013. Disponível em:  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662013000500005](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662013000500005).  
 Acesso em: 14 out. 2019.

FILLA, J. C. **Estudo da utilização de pó ultrafino de basalto como adição na preparação de um cimento mitigador de reação álcali-silica**. 2011. 154 p. Dissertação. Mestrado em Engenharia - Universidade Estadual de Londrina, Londrina - PR, 2011. Disponível em:  
<http://www.uel.br/pos/enges/portal/pages/arquivos/dissertacao/72.pdf>. Acesso em: 17 out. 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Soil is a non-renewable resource**. 2015. Infográfico. Disponível em:  
<http://www.fao.org/assets/infographics/FAO-Infographic-IYS2015-fs1-en.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2019.

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE – IPNI. **Manual Internacional de Fertilidade do Solo**. 1998. 2. ed. rev. e aum. 177 p. Disponível em:  
[http://brasil.ipni.net/ipniweb/region/brasil.nsf/0/40A703B979D0330383257FA80066007/\\$FILE/Manual%20Internacional%20de%20Fertilidade%20do%20Solo.pdf](http://brasil.ipni.net/ipniweb/region/brasil.nsf/0/40A703B979D0330383257FA80066007/$FILE/Manual%20Internacional%20de%20Fertilidade%20do%20Solo.pdf). Acesso em: 15 set. 2019.

LA SERNA, H. A. de, & Rezende, M. M. (2012). **Agregados para a Construção Civil**. In Manual de agregados para a construção civil (pp. 602–635).

MARTINAZZO, R., Bergmann, M., Silveira, C. A. P., Bamberg, A. L., Torres, D. P., & Sander, A. (2020). **Micronutrientes e metais pesados em agrominerais: caracterização de rochas do escudo sul-rio-grandense e da Bacia do Paraná**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1127490/micronutrientes-e-metais-pesados-em-agrominerais-caracterizacao-de-rochas-do-escudo-sul-rio-grandense-e-da-bacia-do-parana>. Acesso em: 20 mar. 2022

MARTINS, M. E. **Atributos de um Latossolo sob aplicação de vinhaça e cultivo de cana-de-açúcar**. 2011. 67 p. Dissertação. Mestrado em Agricultura Tropical - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá - MT, 2011. Disponível em:  
<https://www.ufmt.br/ppgat/images/uploads/Disserta%c3%a7%c3%b5es-Teses/Disserta%c3%a7%c3%b5es/2012/MA%c3%8dRA%20DE%20EM%c3%8dLIO%20MARTINS.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2019.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Instrução Normativa Nº 5 DE 10/03/2016**. Ficam estabelecidas as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 14 mai. 2016. Seção 1, p. 10-11.

MELAMED, R.; GASPAR, J.C.; MIEKELEY, N. **Pó-de-rocha como fertilizante alternativo para sistemas de produção sustentáveis em solos tropicais**. (Série

estudos e documentos, 72). Disponível em: [https://www.cetem.gov.br/serie\\_sed.htm](https://www.cetem.gov.br/serie_sed.htm). Acesso em: 16.set. 2019.

NITSCHKE, P. R. et al. **Atlas climático do estado do Paraná**. Londrina (PR): Instituto agrônomo do Paraná (IAPAR), 2019. E-book (210 p.). ISBN 978-85-88184-58-3. Disponível em: [http://www.iapar.br/arquivos/File/zip\\_pdf/AtlasClimaticoPR.pdf](http://www.iapar.br/arquivos/File/zip_pdf/AtlasClimaticoPR.pdf)

NOVOTNY, E. H., Pasqualoto, L., Luiz, C., & Colnago, A. (2022). **Caracterização da matéria orgânica do solo**. In *O solo: estrutura e composição* (pp. 153–196).

Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/230830/1/Caracterizacao-da-materia-organica-do-solo-2022.pdf>.

ROSA, F. R. **Propriedade físicas e químicas de um solo arenoso sob cultivo de Eucalyptus spp.** 2010. 92 p. Dissertação. Mestrado em Engenharia Florestal - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2010. Disponível em: [http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Suzana\\_Ferreira\\_Da\\_Rosa\\_Dissertacao.pdf](http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Suzana_Ferreira_Da_Rosa_Dissertacao.pdf). Acesso em: 13 set. 2019.

RStudio Team (2020). RStudio: **Desenvolvimento Integrado para R**. RStudio, PBC, Boston, MA Disponível em: <http://www.rstudio.com/>. Acesso em: 19 nov. 2021.

SAMPAIO, E.V.S.B. et al. **Caracterização da caatinga e fatores ambientais que afetam a ecologia das plantas lenhosas**. Pp. 129-142. In: V.C. Sales (ed.). *Ecosistemas brasileiros: manejo e conservação*. Fortaleza, Expressão Gráfica e Editora.

SILVA, A. L. da. (2013). **Caracterização Mineralógica por Difração de RaiosX e Determinação de Terras Raras por ICP-MS de Rochas da Região Sul da Bahia**. [Dissertação]. Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-97XP2T>. Acesso em: 18 mar. 2022

SILVA, F. M.; CHAVES, M. S.; LIMA, Z. M. C. **Relação entre pedogênese e morfogênese e morfologia dos solos**. [S. l.: s. n.], 2009. 240 p. ISBN 978-85-7273-564-3. Disponível em: [http://www.ead.uepb.edu.br/arquivos/cursos/Geografia\\_PAR\\_UAB/Fasciculos%20-%20Material/Geografia\\_Fisica\\_II/Geo\\_Fis\\_II\\_A08\\_M\\_GR\\_SF\\_SI\\_SE\\_260509.pdf](http://www.ead.uepb.edu.br/arquivos/cursos/Geografia_PAR_UAB/Fasciculos%20-%20Material/Geografia_Fisica_II/Geo_Fis_II_A08_M_GR_SF_SI_SE_260509.pdf). Acesso em: 26 set. 2019.

SIMONI, M.; LORINI, K. C. **Diagnóstico das atividades desenvolvidas por mineração de rocha basáltica da pedreira R.A LTDA**. 2011. 154 p. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira - PR, 2011. Disponível em: [http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/552/1/MD\\_COGEA\\_2011\\_1\\_16.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/552/1/MD_COGEA_2011_1_16.pdf). Acesso em: 16 out. 2019.

SOBRAL, L. F., Barretto, M. C. de V., da Silva, A. J., & dos Anjos, J. L. (2015). **Guia Prático para Interpretação de Resultados de Análises de Solo**. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1042994/1/Doc206.pdf> Acesso em: 18 mar. 2022

THEODORO, S. H. et al. **A Importância de uma Rede Tecnológica de Rochagem para a Sustentabilidade em Países Tropicais**. Rev. Brasileira de Geografia Física, v. 5, n. 6, p. 1390-1407, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/232929>. Acesso em: 29 set. 2019

THEODORO, Suzi Maria de Córdova Huff. **A Fertilização da Terra pela Terra: uma alternativa para a sustentabilidade do pequeno produtor rural**. Brasília: Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável, 2000.221p. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/20881>. Acesso em: 29 set. 2019

TOLEDO, M. C. M. de; TEIXEIRA, W; BOUROTTE, C. L. M. **Geologia**. 1. ed. São Paulo: USP/UNIVESP/EDUSP, 2014. v. 1. 280p.