

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS JABOTICABAL**

**REMINERALIZADOR DE BASALTO: IMPLICAÇÕES NOS
ATRIBUTOS QUÍMICOS E MINERALÓGICOS DOS SOLOS
DE DIFERENTES MATERIAIS DE ORIGEM**

Luana Bianca Oliveira da Silva
Engenheira Florestal

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS JABOTICABAL

**REMINERALIZADOR DE BASALTO: IMPLICAÇÕES NOS
ATRIBUTOS QUÍMICOS E MINERALÓGICOS DOS SOLOS
DE DIFERENTES MATERIAIS DE ORIGEM**

Discente: Luana Bianca Oliveira da Silva

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

Co-orientadora: Dra. Kathleen Fernandes

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,
Câmpus de Jaboticabal, como parte das
exigências para a obtenção de título de
Mestre em Agronomia (Produção Vegetal).

S586r

Silva, Luana Bianca da

Remineralizador de basalto: implicações nos atributos químicos e mineralógicos dos solos de diferentes materiais de origem / Luana Bianca Oliveira da Silva. – Jaboticabal, 2023
80p.: il., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: José Marques Júnior

Coorientadora: Kathleen Fernandes Braz

1. Mineralogia. 2. Solos Manejo. 3. Fertilidade do solo. 4. Rocha.
I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo Autor(a)

Essa ficha não pode ser modificada

IMPACTO ESPERADO NA SOCIEDADE

Ainda não se tinha relacionado a mineralogia de solos com diferentes geologias e o uso de remineralizador. A partir dessa pesquisa novos desafios são impostos para que essa prática seja cada vez mais adotada e correlacionada com os inúmeros fatores do solo que podem melhorar a dinâmica química, física e biológica. Ainda não se tem definido doses e formas de aplicação para este produto no solo. Dessa forma, a aplicação de rochas silicáticas é uma forma do país ser autossuficiente em termos de produção agrícola para a correção dos solos altamente intemperizados e com baixas cargas permanentes.

EXPECTED IMPACT ON SOCIETY

Soil geology had not yet been linked to the use of remineralizers. From this research, new challenges are imposed so that this practice is increasingly adopted and correlated with the countless soil factors that can improve mineralogical, chemical, physical and biological dynamics. The doses and method of application of this product to the soil have not yet been defined. Therefore, the application of silicate rocks is a way for the country to be self-sufficient in terms of agricultural production to correct highly weathered soils with low permanent loads.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: REMINERALIZADOR DE BASALTO: IMPLICAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E MINERALÓGICOS DOS SOLOS DE DIFERENTES MATERIAIS DE ORIGEM

AUTORA: LUANA BIANCA OLIVEIRA DA SILVA

ORIENTADOR: JOSE MARQUES JUNIOR

COORIENTADORA: KATHLEEN FERNANDES BRAZ

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **JOSE MARQUES JUNIOR**
Data: 01/02/2024 12:27:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pesquisador Dr. ÉDER DE SOUZA MARTINS (Participação Virtual)
Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados / Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) - Brasília/DF

Documento assinado digitalmente
 **ÉDER DE SOUZA MARTINS**
Data: 01/02/2024 16:59:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pós-doutoranda MARA REGINA MOITINHO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **MARA REGINA MOITINHO**
Data: 01/02/2024 15:44:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 11 de dezembro de 2023

DADOS CURRICULARES

LUANA BIANCA OLIVEIRA DA SILVA – Filha de Damião Dias da Silva e Maria Odsilene da Silva Oliveira, nasceu em Castanhal – PA, no dia 14 de maio de 1996. Em fevereiro de 2014 ingressou no Curso de Engenharia Florestal pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Campus Paragominas. Foi bolsista de Iniciação Científica (2017–2018) pelo programa de pesquisa interno da UFRA. Participou do grupo de pesquisa Biodiversidade da Amazônia (BIOAMA) trabalhando com pesquisas relacionadas a Biomassa Vegetal (2017-2019), estagiária na Fundação de Apoio à Pesquisa, Extensão e Ensino em Ciências Agrárias (FUNPEA) trabalhando no Consórcio de Pesquisa em Biodiversidade Brasil-Noruega (BRC) (2017 - 2019). No período de (2019-2021) concluiu pós-graduação em Agricultura de Precisão pela instituição Faveni. Em 2021 ingressou no programa de Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal), na Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal – SP, desenvolvendo a pesquisa “Alterações mineralógica e química em solos promovidas por remineralizador de basalto” com bolsa de fomento (CAPES). Atualmente faz parte do grupo de pesquisa Caracterização de Solo para Manejo Específico (CSME), com atuação nas seguintes áreas: Suscetibilidade Magnética (SM), Difração de Raios-X (DRX), Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) com foco na mineralogia dos solos.

“Louvai ao Senhor, porque ele é bom; porque sua benignidade é para sempre”

Salmos 136:1.

DEDICO

Aos meus pais, Damião Dias da Silva e Maria Odsilene Oliveira da Silva.

OFEREÇO

A Deus!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus! Por sempre estar ao meu lado nos melhores e piores momentos. Por me dar forças para continuar lutando pelos meus sonhos e concretizá-los. Apesar de, todas as dificuldades, Deus nunca permitiu que eu me sentisse sozinha, gratidão meu pai amado.

Ao meu noivo Jakson Luís Silva dos Santos pelo apoio, incentivo e parceria, por sempre está comigo apesar da distância de 2.276,2 km, por todo carinho e cuidado. Aos meus pais Damião Dias e Maria Odsilene que desde os meus 17 anos me apoiam nos estudos.

As minhas irmãs, Brenda Daniele Oliveira da Silva que sempre foi minha inspiração desde criança. A Bruna Oliveira da Silva pelas conversas e descontrações mesmo a distância, sempre se fez presente. Ao meu irmão Duran Oliveira, e meu sobrinho Victor Gael, que me ensina todas as vezes, seja por um pequeno gesto. O amor e carinho de vocês faz com que eu seja cada vez mais forte.

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, e ao programa de pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) pela oportunidade de aprendizagem e desenvolvimento profissional e pessoal. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao meu professor, mentor e orientador Dr. José Marques Júnior pela confiança nesses anos de orientação, convivência, ensinamentos e os cafezinhos. A minha co-orientadora Dr^a Kathleen Fernandes pelos seus ensinamentos, amizade e momentos de descontração. E por não medir esforços para que seus ensinamentos fossem bem aplicados, muito obrigado.

Aos estatísticos, professor Gener Tadeu e Mara Moitinho, vocês são sensacionais. A Denise Delarica, Aline Schneiders por toda ajuda, descontrações, risadas vocês são maravilhosas. Ao colega de laboratório João de Deus e os ICs por toda colaboração.

A minha amiga Eliane Cristo, que mesmo a distância sempre se fez presente em minha vida. A Maria Isis e a Ester, vocês faziam com que eu me sentisse em casa.

A todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta para a obtenção desse tão sonhado título.

Muito Obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO.....	xii
ABSTRACT	xiii
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE FIGURAS.....	xv
CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais	1
1. Introdução.....	1
2. Revisão de Literatura.....	3
2.1. Mineralogia do Solo.....	3
2.2. Rochas Areníticas	5
2.3. Rochas Basálticas.....	5
2.4. Remineralização do Solo	6
2.5. Uso de sensores proximais para avaliar os atributos do solo.....	9
Referências	11
CAPÍTULO 2 – Remineralizador de basalto: caracterização dos atributos químicos e mineralógicos de solos de diferentes geologias	23
2.1. Introdução	23
Material e Métodos.....	24
2.2.1 Caracterização da área de estudo.....	24
2.2.2 Caracterização do remineralizador de basalto	25
2.2.3 Coleta e Delineamento Amostral.....	27
2.2.4 Análises laboratoriais	28
2.2.4.1 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (EFRx)	28
2.2.4.2 Suscetibilidade Magnética (SM)	28
2.2.4.3 Análises mineralógicas.....	29
2.2.5 Análises Química.....	30
2.2.6 Análises Estatísticas.....	31
2.3 Resultados e Discussões	31
2.3.1 Caracterização química dos solos.....	31
2.3.4 Caracterização geoquímica.....	35

2.3.1 Caracterização mineralógica dos solos	36
2.3.5 Correlação das variáveis dos solos	47
Conclusões.....	51
Referências	52
Considerações Finais.....	63
Apêndice	64

REMINERALIZADOR DE BASALTO: IMPLICAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E MINERALÓGICOS DOS SOLOS DE DIFERENTES MATERIAIS DE ORIGEM

RESUMO: Os solos desempenham um papel crucial para garantir a segurança alimentar. A intensa exploração e a adoção de práticas agrícola inadequadas leva ao desequilíbrio e degradação dos solos. Nesse contexto, o uso de remineralizadores como insumos estratégicos para maior disponibilização de nutrientes de plantas fixados ao solo pode ser uma ferramenta que agrega maior valor ecossistêmico, diminuindo o impacto das práticas convencionais de manejo do solo. Assim, com o presente estudo objetivou-se avaliar os atributos químicos e mineralógico do solo de geologias arenítica e basáltica após adição do remineralizador de basalto. Os solos foram coletados em dois pontos na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão FEPE – Unesp, Jaboticabal-SP e acondicionados em vasos de 1,5 L. O remineralizador de basalto utilizado é uma excelente fonte de Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe, Si, K e micronutrientes. O experimento consistiu em um sistema fatorial 4×2 , sendo testadas três doses do remineralizador (0,4; 0,8 e 1,6 t ha⁻¹) e um controle (sem remineralizador), duas formas de aplicação do remineralizador: revolvido (MR) e lanço (ML), e dois solos com geologias distintas originados de rocha arenítica e basáltica, não considerados como um fator para análise estatística, totalizando 48 vasos. Após 90 dias de experimento, os solos foram submetidos a análise de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (EFRx), Suscetibilidade Mágnética (SM), Difratometria de Raios-X. Os dados foram avaliados por meio da análise da variância e análise multivariada de agrupamento por método hierárquico, representada em mapas de calor (Heatmaps). Aos 90 dias de experimento ocorreu alteração nos picos dos minerais: Caulinita (Ct), Gbbsita (Gb) e Hematita (Hm), dos principais minerais dos solos. Indicando que houve alteração nos solos de diferentes geologias. Observa-se alterações em ambos os solos estudados. Na geologia de arenito, o pH (5,33 - 5,75) consequentemente aumentou SB (47,44 – 53,09 mmolc dm³) e CTC (72,53 – 74,51 mmolc dm³). A relação do ferro oxalato e ditiotinito (feo/fed) foi de (0,025 – 0,042 g kg⁻¹) e a Suscetibilidade Magnética %xFD (9,57 – 10,54). Nos solos de origem basáltica o pH foi de (6,70 – 6,89), CTC (75,63 – 80,79 mmolc dm³) e SB (61,95 – 67,63 mmolc dm³). O feo/fed (0,079 – 0,049 g kg⁻¹) e a %xFD (8,19 – 8,63). O tratamento que apontou maior interação no solo foi 0,8 t ha⁻¹ ML para geologia arenítica e 1,6 t ha⁻¹ ML para geologia basáltica.

Palavras-chave: Mineralogia, Solos Manejo, Fertilidade do Solo, Rocha.

BASALT REMINERALIZER: IMPLICATIONS ON THE CHEMICAL AND MINERALOGICAL ATTRIBUTES OF SOILS FROM DIFFERENT MATERIALS OF ORIGIN

ABSTRACT: Soils play a crucial role in ensuring food security. Intense exploitation and the adoption of inappropriate agricultural practices leads to soil imbalance and degradation. In this context, the use of remineralizers as strategic inputs for greater availability of plant nutrients fixed to the soil can be a tool that adds greater ecosystem value, reducing the impact of conventional soil management practices. Thus, the present study aimed to evaluate the chemical and mineralogical attributes of sandstone and basalt geology soil after addition of basalt remineralizer. The soils were collected at two points at the FEPE Teaching, Research and Extension Farm – Unesp, Jaboticabal-SP and placed in 1.5 L pots. The basalt remineralizer used is an excellent source of Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe, Si, K and micronutrients. The experiment consisted of a 4×2 factorial system, testing three doses of the remineralizer (0.4, 0.8 and 1.6 t ha^{-1}) and a control (without remineralizer), two ways of applying the remineralizer: revolved (MR) and haul (ML), and two soils with different geologies originating from sandstone and basalt rock, not considered as a factor for statistical analysis, totaling 48 vessels. After 90 days of experiment, the soils were subjected to analysis by X-ray Fluorescence Spectrometry (EFRx), Magnetic Susceptibility (SM), X-ray Diffraction. The data were evaluated using analysis of variance and multivariate cluster analysis using a hierarchical method, represented in heat maps (Heatmaps). After 90 days of the experiment, there was a change in the mineral peaks: Kaolinite (Ct), Gbbsite (Gb) and Hematite (Hm), the main minerals in the soil. Indicating that there was change in the soils of different geologies. Changes were observed in both soils studied. In sandstone geology, pH (5.33 - 5.75) consequently increased SB (47.44 – 53.09 mmolc dm^3) and CTC (72.53 – 74.51 mmolc dm^3). The ratio of iron oxalate and dithionite (feo/fed) was (0.025 – 0.042 g kg^{-1}) and the Magnetic Susceptibility %x_{FD} (9.57 – 10.54). In soils of basaltic origin, the pH was (6.70 – 6.89), CTC (75.63 – 80.79 mmolc dm^3) and SB (61.95 – 67.63 mmolc dm^3). The feo/fed (0.079 – 0.049 g kg^{-1}) and the %x_{FD} (8.19 – 8.63). The treatment that showed the greatest interaction in the soil was 0.8 t ha^{-1} ML for sandstone geology and 1.6 t ha^{-1} ML for basalt geology.

Keywords: Mineralogy, Soil Management, Soil Fertility, Rock.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização geoquímica dos óxidos de ferro por fluorescência de raios-X.	26
Tabela 2. Determinação da proporção modal das fases dos minerais cristalinos pelo método de Rietveld por difração de raios-X.	26
Tabela 3. Análise de variância para os atributos do solo de geologia arenítica e basáltica dos manejos em função das doses.	45
Tabela 4: Análise de variância da razão dos minerais Goethita e Hematita, Caulinita e Gibbsita para os atributos do solo de geologia arenítica e basáltica dos manejos em função das doses.	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Empresas brasileiras produtoras de remineralizadores de solos por estado no Brasil, 2021. Fonte: Embrapa, 2021.....	8
Figura 2: Difratoograma do remineralizador de basalto, com refinamento de Rietveld, usando o programa PDXL, recomendado pela empresa Rigaku, fabricante do equipamento.....	27
Figura 3: Instalação do experimento.	28
Figura 4: Acidez ativa - pH, Acidez Potencial - H+Al, Soma de Bases SB (mmolc dm ³) e Saturação por Bases (V%) em solos de geologia arenítica e basáltica após 90 dias de incubação do remineralizador de basalto.	32
Figura 5: Atributos químicos do solo de geologia arenítica e basáltica após a adição do remineralizador de basalto.	34
Figura 6. Conteúdo oxídico para os solos de origem arenítica e basáltica estimada pela EFRx.....	36
Figura 7: Difratoogramas de raios-X dos minerais da fração argila dos solos de geologia arenítica e basáltica. Ct – caulinita, Gb – gibbsita, Gt – goethita, Hm - hematita.	37
Figura 8. Difratoogramas de raios-X dos minerais caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) da fração argila após a remoção dos óxidos de ferro dos solos originados de geologia arenítica (A) e basáltica (B), após a adição do remineralizador de basalto.	39
Figura 9. Padrão dos picos dos materiais sintéticos hematita - Hm e goethita – Gt.	40
Figura 10. Difratoogramas de raios-X dos minerais goethita (Gt) e hematita (Hm) da fração argila após a concentração dos óxidos de ferro dos solos de geologia arenítica (A) e basáltica (B), com a adição do remineralizador de basalto.	42
Figura 11: Gráfico de heatmap ($R^2=0,82$; $p < 0,01$) com atributos de solo (ML –manejo lanço) e (MR – manejo revolvido) em função das doses do remineralizador de basalto no solo de geologia arenítica.....	49
Figura 12: Gráfico de heatmap ($R^2=0,78$; $p < 0,01$) com atributos de solo nos manejos (ML – lanço) e (MR – revolvido) em função das doses do remineralizador de basalto no solo de geologia basáltica..	50

CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais

1. Introdução

Há um consenso global sobre a importância de se estabelecer políticas agrícolas para garantir a segurança alimentar (Johnston et al., 2023). Neste cenário o solo tem ganho reconhecimento nas últimas décadas. Este importante recurso natural está associado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas (ONU) (Evans et al., 2021), destacando-se principalmente em relação ao segundo objetivo: acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar, melhorar a nutrição e promover a agricultura sustentável.

As projeções futuras indicam que em 2050 o mundo terá cerca de 9,7 bilhões de pessoas e em 2080 atingirá um pico de 10,4 bilhões (ONU, 2022). Para suprir a demanda por alimento, a produtividade agrícola deve aumentar pelo menos cerca de 70% (ONU, 2022). Esses dados são alarmantes, uma vez que de acordo com estudos da ONU para alimentação e agricultura, cerca de 33% dos solos do mundo enfrentam os efeitos da degradação (FAO, 2022).

O Brasil é um dos maiores produtores de alimento, ocupa a quarta posição a nível mundial (FAO, 2022) todavia, é dependente na importação de insumos agrícolas devido os solos serem altamente intemperizados, com baixa fertilidade, poucas cargas permanentes, elevados teores de acidez trocável e alumínio (Kämpf e Curi, 2000; Coelho e Vidal-Torrado, 2003; Ker et al., 2015; Silva et al., 2021). A produção nacional de fertilizantes é aproximadamente 19%. O principal nutriente aplicado no Brasil é o potássio, com 38%, seguido por cálcio, com 33%, e nitrogênio, com 29% (Brasil, 2021).

A prática de manejo com o uso de remineralizadores no Brasil se iniciou em 1950 no estado de Minas Gerais (Ilchenko, 1955; Guimarães, 1955). A partir de 1970 os pesquisadores, Leonardos et al. (1976), Fyfe e Leonardos (1978) e Kronberg et al. (1987) acreditavam que o uso de remineralizador rico em nutrientes era capaz de repor os nutrientes do solo, principalmente nas regiões tropicais. Ao longo dos anos, pesquisas vêm demonstrar benefícios com o uso deste insumo (Theodoro et al., 2006; Melo et al., 2012; Ramos et al., 2015; Rodrigues et al., 2021).

Dentre os benefícios fornecidos aos solos, destacam-se: aumento de disponibilidade de nutrientes, elevação da CTC, correção de acidez (Theodoro, 2000; Ramos et al., 2015, Conceição et al., 2022; Höfig et al., 2023), imobilização de metais pesados e redução da biodisponibilidade de compostos tóxicos extraíveis (Garbowski et al., 2023), proporcionando um sistema agrícola sustentável para produção de alimentos e se mostrando como uma alternativa para diminuir a dependência do país.

O remineralizador ou rocha moída, de acordo com a Lei 12.890/2013 é um “material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos e que alterem os índices de fertilidade do solo e promova a melhoria das propriedades física, química e biológica” (Brasil, 2013). As rochas silicáticas moídas que atendem aos critérios da Instrução Normativa 05/2016 do MAPA (Brasil, 2016) é considerado como um processo de remineralização.

Os resíduos de britagem e corte das rochas podem ser reutilizados no setor agrícola desde que atendam a Instrução Normativa 05/ 2016 do MAPA, sendo mais um benefício associado à destinação sustentável de dejetos industriais (Tebar et al., 2021). O reuso desse material é uma prática que visa regenerar os solos promovendo um efeito residual melhorando sua estrutura (Souza, 2022). A utilização em lavouras comerciais, demonstra resultados satisfatórios, o qual visa à diminuição do valor gasto em fertilizantes minerais convencionais (Spagnol et al., 2023).

A ciência da geodiversidade dos solos brasileiros tem a sua contribuição econômica, social e ambiental. O efeito da degradação que o solo vem enfrentando no decorrer dos anos, a baixa fertilidade natural, a dependência do país com a importação de insumos, salientam estudos que viabilizem a saúde do solo e a busca por fontes alternativas de para reposição de nutrientes.

O estudo da geologia dos solos, possibilita a compreensão a formação de minerais e rocha assim como sua interação com o meio (Gerrard, 1993; Daniels et al., 1971). As geologias de arenito é basalto são bastantes estudadas no Brasil, devido sua representatividade socioeconômica, representando cerca de 9,4 milhões de hectare no estado de São Paulo (Chitlhango, 2021; Fernandes et al., 2020).

Com o intuito de entender o comportamento dos solos após a adição do remineralizador de basalto e verificar se há ocorrência de alterações a nível mineralógico, melhorando suas funções ecossistêmicas, sendo uma alternativa segura,

rápida e eficiente. Este estudo teve como objetivo avaliar o comportamento dos atributos químicos e mineralógicos do solo de geologia arenítica e basáltica após a adição do remineralizador de basalto.

2. Revisão de Literatura

2.1. Mineralogia do Solo

O solo é uma coleção de corpos naturais, constituído por partes sólidas, líquidas e gasosas, formados por materiais minerais e orgânicos (Santos et al., 2018). São misturas complexas de sólidos constituídos com partículas de diâmetros que variam de milímetros até dimensões em nanômetros (10^{-9} m) (Filho, 2016). É um dos principais compartimentos da biosfera em termos de reservatório biológico, além de funcionar como um importante reservatório de água, suporte essencial do sistema agrícola e atividade humana (Cotta, 2016).

O material de origem influencia direta e indiretamente várias propriedades do solo (Santos et al., 2010). Os minerais existentes na rocha de origem, quando expostos a condições diferentes daquelas em que foram formados, começam a se decompor, liberando íons à solução e formando minerais mais estáveis às novas condições (Resende et al., 2014). Assim, o intemperismo ocorre em diferentes velocidades e variações, apresentando características ou atributos que se tornam mais ou menos susceptíveis a este processo (Ker et al., 2012).

A mineralogia dos solos está presente nas frações areia, silte e argila. Na fração área e silte do solo o quartzo é o principal mineral com menor quantidade de muscovita e alguns feldspatos potássicos derivados de rochas ácidas (Melo et al., 2009). Na argila encontra-se a caulinita (Ct), gibbsita (Gb), hematita (Hm) e goethita (Gt) em proporções variadas, dependendo do tipo de material de origem, intensidade do intemperismo e drenagem do sistema (Ker, 1997).

Os minerais na fração argila desempenham um papel fundamental no controle das propriedades físico-químicas do solo, incluindo a capacidade de troca de cátions (CTC), dinâmica de sorção, estabilização do carbono, capacidade de retenção de água e características de encolhimento/inchaço (Lyu et al., 2022). Nos solos tropicais

a mineralogia é composta principalmente por argilominerais 1:1, óxidos de ferro e alumínio (Kämpf et al., 2012) e são caracterizados como solos que apresentam baixa atividade na fração argila (Resende et al., 2014).

A formação de cargas nos minerais 1:1 ocorre devido à substituição isomórfica ou a cargas dependentes de pH, que se desenvolvem nas bordas quebradas dos minerais, podendo ser negativas ou positivas (Oliveira e Brighenti, 2011). Os minerais de argila silicatados são essencialmente silicatos de alumínio hidratados com Fe ou Mg, substituindo total ou parcialmente o Al, os óxidos de Fe e Al são produto da insolubilização destes elementos e se apresentam como oxidróxidos, principalmente na forma cristalina (Oliveira e Brighenti, 2011).

A Ct é um argilomineral composto por alumínio, silício, oxigênio e OH, com estrutura simples de camadas 1:1. A formação da Ct se dá preferencialmente, em ambientes muito diluídos, alta lixiviação ou presença de ácidos orgânicos e CO₂, provenientes de compostos ricos em matéria orgânica (Teixeira et al., 2016). A Gb é um oxi-hidróxido de alumínio formado após intemperismo químico com intensa lixiviação sobre rochas ricas em feldspatos ou outros minerais aluminosos em clima quente e úmido (Leme, 2017).

Além da Ct e Gb, os óxidos de ferro têm papel importante nos solos. Na fração argila, Gt e Hm são os mais abundantes e estudados (Hsieh et al., 2024; Zhao et al., 2024; Rosin et al., 2023; Silva et al., 2023; Pereira et al., 2020; Souza Bahia et al., 2015). A Gt é indicada pela coloração amarelada ou brunada e a Hm imprime coloração avermelhada, até mesmo quando presente em menor quantidade no solo (Pereira et al., 2020). A Hm assim como a Gt são difundidas em solos, sedimentos e rochas, apresentam alta estabilidade termodinâmica e são constituintes importantes para a formação do Fe (Bigham et al., 2002).

Pereira et al. (2020) estudando a mineralogia dos solos tropicais, afirma que boa parte de todo processo de sorção e nutrição das plantas está associado à matriz mineral dos solos, sendo fontes de reserva nutricional relacionado aos minerais constituintes com grande importância ambiental e forte conotação com o uso e manejo. O conhecimento sobre as propriedades a nível mineralógico do solo é indispensável para a melhoria da fertilidade e sustentabilidade desse ecossistema (Ramaroson et al., 2018).

2.2. Rochas Areníticas

Os arenitos são rochas sedimentares que passaram por processo de litificação da deposição de areias. São pacotes empilhados que podem ou não estar separados por sedimentos de granulação mais fina (argilitos, siltitos, argilas) ou conglomerados mais grosseiros (Migon, 2021). Constituídos predominantemente por quartzo, granadas, micas e outros minerais que podem estar presentes em quantidades variáveis (Marques Júnior, 2005).

A predominância de quartzo em sua composição, ocasiona maior resistência ao intemperismo (Migoñ, 2021). A alta quantidade de quartzo e outros minerais, como os feldspatos favorecem maior ocorrência de minerais como a Ct e Gb (Fernandes et al., 2020), sendo caracterizados por apresentarem coloração geralmente avermelhada ou rosa-avermelhado, branca e amarelada, classificados, friáveis, porosos e, mais localmente, compactos e duros, sem estratificação (IBGE, 1986).

Os solos derivados dos arenitos são principalmente os Latossolos Vermelhos de textura franco arenosa e os Argissolos Vermelho-Amarelos de textura arenosa/média, em relevos suave-ondulados a ondulados (Fernandes et al., 2007, Ker et al., 2015; Santos et al., 2018). O Planalto Ocidental Paulista é predominantemente composto por arenitos (85%) pela Formação do Vale do Rio Peixe (Fernandes e Magalhães-Ribeiro, 2015). O arenito do Vale do Rio Peixe é caracterizado sendo muito finos a finos, pouco erosivo, com aspecto maciço ou estratificação cruzada tabular e acanalada de médio e pequeno porte, nos extratos maciços podem ocorrer, superfícies onduladas, ondulações de adesão, planos bem definidos, localmente apresenta cimentação intensa por CaCO_3 (Fernandes e Coimbra 2000), que por vezes, forma crostas sub-horizontais (Fernandes, 1998).

2.3. Rochas Basálticas

O basalto é uma rocha vulcânica que cobre extensas áreas da Bacia Geológica do Paraná, nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. É caracterizado por apresentar cristalização fina e cores escuras, variando do vermelho-escuro ao preto com cristais individuais que só podem ser vistos através do microscópio (Marques

Júnior, 2005). Como características texturais, apresenta afaníticos e menos comumente faneríticos, finos a médios, mostrando-se, muito raramente porfiróides, estruturas vesículo amigdaloidal são bastante comuns e capas de alteração límonítica (IBGE, 1986).

A mineralogia do basalto é composta principalmente por piroxênios e plagioclásios. Alho (1993) encontrou em sua pesquisa que a mineralogia do solo de origem basáltica na região de Jaboticabal–SP é composta por 70% plagioclásio cálcico, 16% por clinopiroxênio, 10% por anfibólio e 4% por minerais acessórios. As variedades de basalto mais comuns são fenocristais formados por piroxênio e olivinas, são essencialmente construídas de minerais ferro-magnesianos e desprovidas de quartzo e feldspato (Marques Júnior, 2005).

A suscetibilidade dos minerais que compõe o basalto apresenta uma taxa de intemperismo conhecida: vidro > olivina > plagioclásio > piroxênio > minerais opacos (Eggleton, 1987). O Planalto Ocidental Paulista tem 13 milhões de hectare, destes 2 milhões são cobertos por basalto (Fernandes et al., 2020). Os solos originados dos basaltos, com ocorrência aos fundos dos vales, são Latossolos Vermelhos de textura argilosa e Nitossolos Vermelhos (Oliveira, 1999).

2.4. Remineralização do Solo

A remineralização do solo é utilizada para rejuvenescer solos pobres e lixiviados (Leonardos et al., 1976), sendo comumente empregada para solucionar problemas associados da má gestão ambiental (Burbano et al., 2022). A incorporação desse material ao solo também é conhecida como rochagem ou petrofertilização e visa reabastecer os nutrientes e proporcionar benefícios agronômicos (Silva, 2016).

De acordo com a Lei 12.890 de 10 de dezembro de 2013, os remineralizadores são definidos como “material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos e que alterem os índices de fertilidade do solo e promova a melhoria das propriedades física, química e biológica”. Brasil. (2016). Instrução Normativa No 5, de 10 de março de 2016. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) estabeleceu as regras sobre

definições, classificações, especificações e garantias dos remineralizadores e substrato para as plantas destinados a agricultura.

O uso do remineralizador é fonte de nutriente para as plantas e atua como agente de rejuvenescimento nos solos. Dessa forma não deve ser visto apenas como um processo de produção de remineralização e fertilizante, mais sim como um processo de reestruturação dos solos (Brito et al., 2019). O uso dessa tecnologia direciona uma agricultura mais sustentável, permitindo restaurar a soberania alimentar e econômica de países agrícolas que dependem da importação de insumos (Theodoro et al., 2012).

A adição do remineralizador nos solos da região tropical, tende a ser mais eficiente, devido a baixa disponibilidade de nutrientes, elevada acidez e ao clima quente e úmido que favorece a dissolução do material pelo intemperismo (Van Straaten, 2006). O intemperismo gradativo dos pós de rocha gera efeito gradual para disponibilização de nutrientes e condicionamento do solo, sendo fonte alternativa de manejo (Martins et al., 2010).

É importante salientar que para o uso de remineralizador como fertilizante é necessário utilizar um elemento rochoso que apresente grande mobilidade, passando a ser um indicativo de intemperismo (Lepchak et al., 2020). A aplicação em culturas de ciclo curto, não pode ser considerada uma adubação, grande parte destes materiais possui baixa solubilidade, principalmente a curto prazo (Costa, 2020).

Ao discutirem a dependência do Brasil para a importação de fertilizantes Theodoro e Leonardos (2011) apontam que o uso de remineralizador mostrou resultados mais satisfatórios em níveis de produtividade, em culturas de ciclo longo. No estudo os autores observam maior teor de umidade do solo, maior e melhor quantidade de massa verde das plantas e raízes mais desenvolvidas, quando comparadas com a adubação convencional.

Souza et al. (2017) avaliando diferentes doses de remineralizador na cultura do milho em um Neossolo Quartzarênico encontrou resultados satisfatórios em relação a elevação do pH e CTC do solo. Writzl et al. (2019) estudando a eficiência do remineralizador de basalto puro e associado a cama de frango no desenvolvimento e produtividade de plantas de milho pipoca em Latossolo de alta fertilidade, encontrou resultados equivalentes com a fertilização química.

A produção de alimento em países tropicais, como no Brasil, tendo base a utilização de fertilizantes químicos solúveis provoca uma série de problemas econômicos e ambientais: a eutrofização dos corpos hídricos, o acúmulo de compostos nitrosos na atmosfera e o endividamento dos agricultores em função dos altos custos de aquisição, são apenas alguns exemplos (Theodoro et al., 2012).

Contudo, o uso de remineralizadores além de melhorar a qualidade do solo gradativamente por quatro ou cinco anos após sua aplicação, tem custo de 70% menor comparado a adubação química (Theodoro e Leonardos, 2011). Alternativas nos sistemas agrícolas que visem a sustentabilidade, têm provocado o desenvolvimento das pesquisas, com o intuito de encontrar soluções para uma agricultura mais tecnológica e produtiva (Silveira et al., 2021).

O Brasil tem grande potencial para produção de remineralizadores, a (Figura 1) ilustra a localização das empresas e produtos registrados como produtores de remineralizadores e fertilizantes minerais. Ribeiro (2021), apresentou em sua pesquisa que o estado de São Paulo tem extensas áreas com litologias compatíveis quimicamente para tal produção. O remineralizador de basalto vem mostrando ser um importante aditivo para solos tropicais, principalmente em solos degradados, ácidos e esgotados em minerais (Melo et al., 2012).

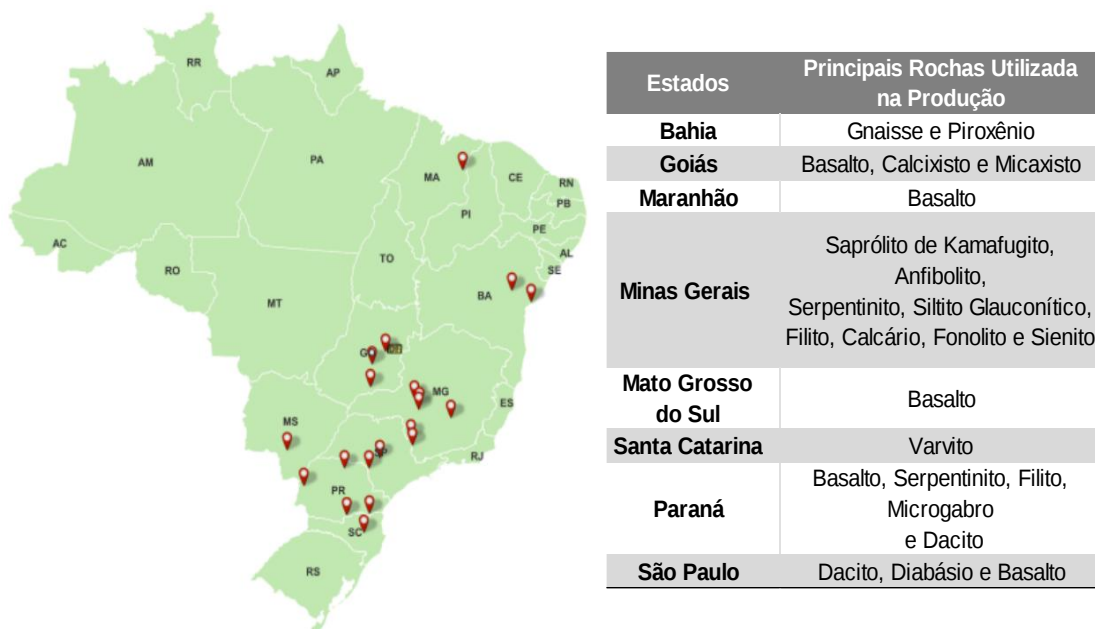


Figura 1: Empresas brasileiras produtoras de remineralizadores de solos por estado no Brasil, 2021. Fonte: Embrapa, 2021.

Devido a sua composição mineralógica, o basalto é uma excepcional fonte de Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe, Si e, eventualmente, K, além dos micronutrientes (Bergmann et al., 2014; Martinazzo et al., 2020). Os agrominerais silicáticos que apresentam eficiência agrônômica tem sido destaque nos sistemas agrícolas (Souza, 2017). O efeito do remineralizador de basalto para os atributos químicos aumenta com a quantidade, diminuição do tamanho de partícula e com o tempo de incubação desse material no solo (Gillman, 1980).

2.5. Uso de sensores proximais para avaliar os atributos do solo

O desenvolvimento de diversos sensores para diferentes fins agrícolas se tornou tendência e visa promover o avanço agrícola para inteligência e automação (Liu et al., 2022). O uso de tecnologias não destrutivas para análise dos atributos dos solos vem ganhando destaque como o método de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (EFRx) (Lemière, 2018; Bueno et al., 2018; Weindorf et al., 2014; Parsons et al., 2013) e Suscetibilidade Magnética (SM) (Dearing, 1996; Matias et al., 2013; Oliveira et al., 2015; Peluco et al., 2015; Brito et al., 2022).

A suscetibilidade magnética é a medida que o material pode ser magnetizado. O conteúdo magnético das rochas é diretamente proporcional aos minerais magnéticos que é composta (Rangel et al., 2021). É produzido pela indução do campo magnético terrestre durante a cristalização do mineral na rocha ou solo, o que se deve às propriedades de rotação do elétron (Luque, 2008; Dearing et al., 1995; Craik, 1995). A análise por fluorescência de raios-X é um método qualitativo e quantitativo multielementar, baseado na medida das intensidades dos raios-X que são emitidos pelo elemento que constitui a amostra (Melo Junior, 2007).

A avaliação dos atributos do solo por meio de sensores proximais se destaca por suas características não destrutivas, preservação de amostras e simplicidade dos procedimentos necessários de preparação de amostras (Curcio et al., 2013, Chakraborty et al., 2015, Demattê et al., 2017). A medida elétrica do solo chama atenção, principalmente, por serem obtidas através de métodos eficientes e rápidos, como os sensores de contato direto com o solo (Celinski, 2011).

Peluco et al. (2013) utilizou a SM como ferramenta de avaliação para entender melhor a capacidade suporte de diferentes áreas a aplicação de vinhaça. Os autores encontraram em sua pesquisa correlação espacial linear significativa com as doses recomendadas de vinhaça e com a capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça. Parra et al. (2022) estudando a adsorção de fósforo, e usando árvore de decisão apontou que a SM foi o atributo mais significativo na predição da adsorção de fósforo no solo.

A análise da fertilidade do solo é uma ferramenta eficiente para diagnóstico da fertilidade do solo, sendo essencial para recomendar quantidades adequadas de corretivos e fertilizantes, resultando no aumento da produtividade das culturas, impactando positivamente na produção e lucratividade (Cardoso et al., 2009). Porém, este método direto é oneroso para análises em larga escala, os métodos indiretos além de gerar lucros, economiza tempo, gera menos resíduos tóxicos ao ambiente, garantindo a rentabilidade e qualidade dos solos agrícolas (Chitlango, 2021).

Referências

Alho DR (1993) **Mineralogia e gênese de solos Litólicos da região de Jaboticabal, SP**. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) – Unesp, Jaboticabal.

Almeida GM, Pereira GT, de Souza Bahia ASR, Fernandes K, Júnior JM (2021) Machine learning in the prediction of sugarcane production environments. **Computers and Electronics in Agriculture** 190: 106452.

Bergmann M, Silveira CAP, Bamberg AL, Martinazzo R, Grecco MF (2014) Considerações sobre o potencial de uso agrônomo das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral da Bacia do Paraná. **Tecnologia e Inovação em Gemas, Jóias e Mineração**. Porto Alegre: UFRGS, p. 119-126.

Bigham, J. M., Fitzpatrick, R. W., & Schulze, D. G. (2002). Iron oxides. **Soil mineralogy with environmental applications**, 7, 323-366.

BRASIL. (2016). **Instrução Normativa 5** - Regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. Brasília, DF: Diário Oficial da União - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=317444>>

BRASIL (2013) **Lei no. 12.890** - Altera a Lei n. 6.894 para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura. Brasília, DF: Diário Oficial da União - Palácio do Planalto. <https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/112213899/lei-12890-13>.

Brasil (2021) Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Potencialidades e desafios do agro 4.0: GT III “Cadeias Produtivas e Desenvolvimento de Fornecedores” Câmara do Agro 4.0 (MAPA/MCTI) / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Sustentável e Irrigação. – Brasília: Mapa/ACES 66 p.

BRASIL (2021) Presidência da República. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050** (PNF 2050) - Uma Estratégia para os Fertilizantes no Brasil. Brasília: SAE, 2021. 195 p.1v.: il. Anexos. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2022/03/plano-nacional-de-fertilizantes-brasil-2050.pdf> Acesso em: 04 nov. 2023.

Brito RS, Batista JF, Vale Moreira JG, Moraes KNO, Silva SO (2019) Rochagem na agricultura: importância e vantagens para adubação suplementar. **South American Journal of basic education, technical and technological** 6: 528-540.

Brito WBM, Campos MCC, Souza FG, de Lima AFL, Oliveira FP, Nunes MT, da Silva DMP (2022) Usos e potencialidades das medidas de suscetibilidade magnética nos solos da amazônia: uma revisão. **Revista Valore** 7: e-7019.

Bueno JDA, De Godoy FO, Santos K, Bettio G, De Souza GB, Bernardi ADC (2018) Avaliação da espectrometria de fluorescência de raios-X como ferramenta auxiliar no mapeamento de solos. **Anais da 10ª Jornada Científica** — Embrapa São Carlos. Disponível <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1095676/1/AvaliacaoEspectrometriaFluorescencia.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2023.

Burbano DFM, Theodoro SH, de Carvalho AMX, Ramos CG (2022) Crushed volcanic rock as soil remineralizer: a strategy to overcome the global fertilizer crisis. **Natural Resources Research** 31: 2197-2210.

Cardoso EL, Fernandes AHBM, Fernandes FA (2009) Análise de solos: finalidade e procedimentos de amostragem. Comunicado técnico. **Embrapa**.

Celinski VG, Celinski, TM (2011) Capacitância elétrica e sua correlação com atributos do solo visando aplicação na agricultura de precisão. **II Simpósio de geoestatística aplicada**. Botucatu – SP.

Chakraborty S, Weindorf DC, Li B, Aldabaa AAA, Ghosh RK, Paul S, Ali MN (2015) Development of a hybrid proximal sensing method for rapid identification of petroleum contaminated soils. **Science of the Total Environment**, v. 514, p. 399-408.

Chien SH, Menon RG (1995) Factors affecting the agronomic effectiveness of 650 phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research** 41: 227-234.

Chitlango AP (2021) **Suscetibilidade magnética e cor na predição do fósforo adsorvido e metais pesados em áreas sob transição basalto – arenito**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Unesp, Jaboticabal.

Coelho MR, Vidal-Torrado P (2003) Desenvolvidos De Arenito Do Grupo Bauru. **Revista Brasileira Ciência do Solo** 27:495–507.

Colaço AF, Richetti J, Bramley RGV, Lawes RA (2021) How will the next-generation of sensor-based decision systems look in the context of intelligent agriculture? A case-study. **Field Crops Research** 270: 108205.

Conceição LT, Silva GN, Holsback HMS, Figueiredo OC, Marcante NC, Souza Martins É, Santos EF (2022) Potential of basalt dust to improve soil fertility and crop nutrition. **Journal of Agriculture and Food Research** 10, 100443.

Costa ACS (2020) **Remineralizadores do solo: aspectos teóricos e práticos**. Agricultura em bases agroecológicas e conservacionista. Ponta Grossa, PR: Atena p. 80-95.

Cotta SR (2016) **O solo como ambiente para a vida microbiana**. Microbiologia do solo. Piracicaba, SP: Esalq p. 23-35.

Couliably S, Kamsu-Foguem B, Kamissoko D, Traore D (2022) Deep learning for precision agriculture: A bibliometric analysis. **Intelligent Systems with Applications** 16: 200102.

Craik D (1995) Magnetism: Principles and Applications. John Wiley and Sons, p. 1-459.

Curcio D, Ciraolo G, D'Asaro F, Minacapilli M (2013) Prediction of soil texture distributions using VNIR-SWIR reflectance spectroscopy. **Procedia Environ. Sci.** 19

Daniels RB, Gamble EE, CADY JG (1971) A relação entre geomorfologia e morfologia e gênese do solo. *Av. Agron*, 23:51-87.

Dearing JÁ, Hay KL, Baban SMK, Huddleston AS, Wellington EMH, Loveland, PJ (1996) Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International** 127: 728–734.

Dearing JA, Lees JAW (1995) Mineral magnetic properties of acid gleyed soils under

Demattê JAM, Horák-Terra I, Beirigo, RM, Terra FS, Marques KPP, Fongaro CT, Silva AC, Vidal-Torrado P (2017) Genesis and properties of wetland soils by VIS-NIR-SWIR as a technique for environmental monitoring. **Journal of environmental management**, v. 197, p. 50-62.

Dixon JB, Schulze DG (2002) Soil mineralogy with environmental applications. **Soil Science Society of America Inc.** Cap 10.

Eggleton RA, Foudoulis C, Varkevisser D (1987) Weathering of basalt: changes in rock chemistry and mineralogy. **Clays and Clay Minerals** 35: 161-169.

Embrapa (2021) **Cadeias Emergentes: Plano Nacional de Fertilizantes**. Disponível https://www.gov.br/agricultura/ptbr/assuntos/camarasetoriaistematicas/documentos/camarastematicas/agricultua-sustentavel-eirrigacao/2022/44ro/cadeias-emergentes-pnf_240322.pdf Acesso 29 de Nov 2023.

Evans DL, Quinton JN, Tye A M, Rodés Á, Rushton J C Davies, JAC, Mudd, SM (2021) How the composition of sandstone matrices affects rates of soil formation. **Geoderma** 401: 115337.

FAO (2022) **The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture** – Systems at breaking point. Main report. Rome.

Fernandes K, Júnior JM, Souza BASR, Dematte JA, Ribon AA (2020) Landscape-scale spatial variability of kaolinite-gibbsite ratio in tropical soils detected by diffuse reflectance spectroscopy. **Catena** 195: 104795.

Fernandes LA (1998) **Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru**.

Fernandes LA, Coimbra AM (2000) Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista brasileira de Geociências** 30: 717-728.

Fernandes LA, De Castro AB, Basilici G (2007) Seismites in continental sand sea deposits of the late Cretaceous Caiua Desert, Bauru Basin, Brazil. **Sedimentary Geology** 199: 51-64.

Fernandes IA, Magalhães-Ribeiro CM (2015) Evolution and palaeoenvironment of the Bauru Basin (Upper Cretaceous, Brazil). **Journal of South American Earth Sciences** 61: 71–90.

Fyfe WS, Leonardos OH (1978) Global tectonics and resources for man: minerals and agriculture. **Jornal de mineralogia**. Volume Djalma Guimarães, Recife, V 7, p. 51 – 58.

Garbowski T, Bar-Michalczyk D, Charazińska S, Grabowska-Polanowska B, Kowalczyk A, Lochyński P (2023) An overview of natural soil amendments in.: agriculture. **Soil and Tillage Research** 225: 105462.

Gerrard J (1993) Geomorfologia do solo – dilemas presentes e desafios futuros. **Geomorfologia**, 7:61-84.

Gillman GP (1980) The effect of crushed basalt scoria on the cation exchange properties of a highly weathered soil. **Soil Science Society of America Journal** 44(3), 465-468.

Guimaraes D (1955) **Contribuição ao estudo dos tufos vulcânicos da Mata da Corda**. Estado de Minas Gerais, Instituto de Tecnologia Industrial p. 31.

Höfig P, de Souza Martins É, Giasson E, Arantes BS (2023) Diferentes rochas moídas no processo de compostagem em Unaí/MG: fertilizante orgânico e autonomia agrícola. **Geographia Opportuno Tempore** 9: e47425-e47425.

Hsieh AI, Dashtgard SE, Clift PD, Lo L, Vaucher R, Löwemark L (2024) Competing influence of the Taiwan orogen and East Asian Summer Monsoon on South China Sea paleoenvironmental proxy records. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 635, 111933.

IBGE (1986) **Levantamento de recursos naturais-folha**. Folha sh.22 Porto Alegre e parte das folhas. Uruguaiana e SL.22 Lagoa Mirim, p. 796.

Ilchenko W (1955) Os tufos da Mata da Corda e seu emprego na Agricultura. Dep. Prod. Vegetal. Belo Horizonte. **Boletim Agricultura** 9-10, 39–71.

Johnston FL, Martins, MMV, Pereira, TF LS (2023) Segurança alimentar e produtividade agrícola: uma análise de equilíbrio geral computável. **Econômica do Nordeste** 54: 87-102.

Kämpf N, Curi N (2000) Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: Tópicos em Ciência do Solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p.107-138.

Kämpf N, Marques JJ, Curi N (2012) Mineralogia de solos brasileiros: principais aspectos. In: Ker JC, Cur N, Schaefer CEGR, Vidal-Torrado P. **Pedologia: Fundamentos**. Viçosa-mg: SBCS, 2012. p. 81-146.

Ker JC (1997) Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos** 5: 17 - 40.

Ker JC, Curi N, Schaefer CE, Vidal-Torrado P (2012) **Pedologia: fundamentos**. Viçosa-MG, SBCS, p.47-80, 2012.

Ker JC, Curi N, Schaefer CEGR, Vidal-Torrado (2015) **Pedologia Fundamentos**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo p.343.

Kronberg BI, Leonardos OH, Fyfe WS (1987) The use of ground rocks in laterite systems – an improvement to the use of conventional soluble fertilizers. **Chemical Geology**, 60(1-4), pp. 361–370.

Leme, TG (2017) Livro de referência de Minerais Comuns e Economicamente Relevantes: HIDRÓXIDOS. **Museu de Minerais, Minérios e Rochas** “Prof. Dr. Heinz Ebert”.

Lemiere B (2018) A review of pXRF (field portable X-ray fluorescence) applications for applied geochemistry. **Journal of Geochemical Exploration** 188: 350-363.

Leonardos OH, Fyfe WS, Kronberg BI (1976) Rochagem: O método de aumento da fertilidade em solos lixiviados e arenosos. **Anais**, 29, 137-145.

Leonardos OH, Fyfe WS, Kronberg BI (1987) The use of ground rocks in laterite systems: an improvement to the use of conventional soluble fertilizers? **Chemical Geology** 60: 361-370.

Lima GC, Figueiredo FL, Barbieri AE, Seki J (2021) Agro 4.0: Enabling agriculture digital transformation through IoT. **Revista Ciência Agronômica** 51: 1 – 15.

Liu C, Xu D, Dong X, Huang Q (2022) A review: Research progress of SERS-based sensors for agricultural applications. **Trends in Food Science & Technology**. 128: 90 – 101.

Luque ECL (2008) Propriedades magnéticas de los óxidos de hierro en suelos

Lyu H, Watanabe T, Ota Y, Hartono A, Anda M, Dahlgren R A, Funakawa S (2022) Climatic controls on soil clay mineral distributions in humid volcanic regions of Sumatra and Java, Indonesia. **Geoderma** 425: 116058.

Marques Júnior J (2005) **Mineralogia e Geologia**. Jaboticabal – SP. p 249.

Martinazzo R, Bergmann M, Silveira C, Bamberg A, Torres D, Sande A, Andréa Sande SG (2020) **Micronutrientes e metais pesados em agrominerais: caracterização de rochas do escudo sul-rio-grandense e da Bacia do Paraná**. Embrapa.

Martins ÉDS, Resende ÁVD, Oliveira CGD, Furtini Neto AE (2010) **Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos**. CETEM/MCT.

Massruhá SMFS, Leite MAA (2016) Agricultura digital. RECoDAF – **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, Tupã, v. 2, n 1, p. 72-88.

Massruhá SMFS, Leite MDA, Luchiari Junior A, Evangelista SRM (2020) **A transformação digital no campo rumo à agricultura sustentável e inteligente**. EMBRAPA, p. 20-45.

Matias SSR, Marques Júnior J, Siqueira DS, Pereira GT (2013) Modelos de paisagem e susceptibilidade magnética na identificação e caracterização do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 43:93-103.

Melo GW, Meurer EJ, Pinto LFS (2004) Fontes de potássio em solos distroféricos caulíníticos originados de basalto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28: 597-603.

Melo V F, Uchôa SCP, Dias, FO, Barbosa GF (2012) Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. **ACTAAMAZONICA** 42: 471 – 476.

Meyer LFF, Braga MJ (2019) Tipologia do uso agrícola do solo no estado do Pará: Uma aplicação de métodos de análise multivariada. **Revista de Economia e Sociologia Rural** p. 69 - 92.

Migoñ P (2021) Sandstone geomorphology – Recent advances. **Geomorphology**, 373: 107484.

Navarro R, Martelócio AC, Sevilha R, Bido G, Mannigel A (2021) Manejo do solo para o sistema de cultivo do café no Brasil. **Enciclopédia Biosfera** 18: 163.

Oliveira IAD, Marques Junior J, Costa Campos MC, Aquino RED, Freitas LD, Siqueira DS, Cunha JMD (2015) Spatial variability and sampling density of magnetic susceptibility and soil properties in ultisols of the manicoré region, am, Brazil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo** 39: 668–681.

Oliveira JB, Camargo MN, Rossi M, Calderano Filho B (1999) **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônômico/EMBRAPA Solos, 1999. v.1. 64p

Oliveira MF, Brighenti AM (2011) Comportamento dos herbicidas no ambiente. **Embrapa** 15: 263 – 304.

ONU (2022) **World Population Prospects 2022**: Summary of Results.

Parra JS, de Souza ZM, de Oliveira SRM, Farhate CVV, Júnior JM, Siqueira D (2022) Phosphorus adsorption prediction through decision tree algorithm under different topographic conditions in sugarcane fields. **Catena** 213: 106114.

Parsons C, Grabulosa EM, Pili E, Floor GH, Roman Ross G, Charlet L (2013) Quantification of trace arsenic in soils by field-portable X-ray fluorescence spectrometry: considerations for sample preparation and measurement conditions. **Journal of Hazardous Materials** 262:1213-1222.

Peluco RG, Marques Júnior J, Siqueira DS, Pereira GT, Barbosa RS, Teixeira DDB (2015) Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 50: 259-266.

Peluco RG, Marques Júnior J, Siqueira DS, Pereira GT, Barbosa RS, Teixeira DDB, Cortez LA (2013) Suscetibilidade magnética do solo e estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 48, p. 661-672.

Pereira TT, Oliveira FS, Freitas DF, Damasceno BD, Dias AC (2020) A mineralogia dos solos tropicais: estado da arte e relação com o uso e manejo. **Geonomos** 28: 1-14.

Pillon CN (2017) Dos pós de rocha aos remineralizadores: passado, presente e desafios. In.: III Congresso Brasileiro de Rochagem. Anais eletrônicos... Pelotas, RS, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Eder-Martins-3/publication/319550032_Anais_do_III_Congresso_Brasileiro_de_Rochagem/links/59b2d4260f7e9b37434ea6c3/Anais-do-III-Congresso-Brasileiro-de-Rochagem.pdf#page=16>. Acesso em 14 fev. 2023.

Ramaroson VH, Becquer T, SSO, Razafimahatratra H, Delarivière JL, Blavet D, Rakotondrazafy AF (2018). Mineralogical analysis of ferralitic soils in Madagascar using NIR spectroscopy. **Catena** 168: 102-109.

Ramos CG, Querol X, Oliveira ML, Pires K, Kautzmann RM, Oliveira LF (2015). A preliminary evaluation of volcanic rock powder for application in agriculture as soil a remineralizer. **Science of the Total Environment**, 512, 371-380.

Rangel LV, Regis SR, Damasceno FB (2021) Importância da análise de susceptibilidade magnética e litogeoquímica em metamagnetitos e meta-magnetitapiroxenitos do alvo gulçari a norte – maracas – Bahia. **Simpósio de Engenharia de Produção**. Universidade Federal de Catalão

Resende M, Curi N, Rezende SB, Corrêa GF, Ker JC (2014) **Pedologia: Bases para distinção de ambientes**. 6ed. Lavras-MG.

Ribeiro AO (2021) Potencial geológico do estado de são paulo na produção de remineralizadores. In.: IV Congresso Brasileiro de Rochagem. Anais eletrônicos... Rio de Janeiro, RJ, 2021. Disponível em: < https://www.researchgate.net/profile/Suzi-Theodoro/publication/358431012_Anais_do_IV_Congresso_Brasileiro_de_Rochagem_proceedings_of_IV_Brazilian_Stonemeal_Congress/links/62026b8f2f2cd844ad7bbae8/Anais-do-IV-Congresso-Brasileiro-de-Rochagem-proceedings-of-IV-Brazilian-Stonemeal-Congress.pdf#page=142>. Acesso em: 21 fev. 2023.

Rockström J et al. A safe operating space for humanity. **Nature** 461, 472-475, 2009.

Rodrigues M, Vahl LC, Silveira CAP, Salé MM, Nanni MR, Batista MA (2021) Co-products from the limestone mining as sources of calcium, magnesium and sulphur. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, 15, p. 100446.

Rosin NA, Demattê JA, Poppiel RR, Silvero NE, Rodriguez-Albarracin HS, Rosas JTF, Fernandes K (2023) Mapping Brazilian soil mineralogy using proximal and remote sensing data. **Geoderma**, 432, 116413.

Santos ADC, Pereira MG, Anjos LHCD, Bernini TA, Cooper M, Nummer AR, Francelino MR (2010) Gênese e classificação de solos numa topossequência no ambiente de mar de morros do médio Vale do Paraíba do Sul, RJ. **Brasileira de Ciência do Solo** 34: 1297-1314.

Santos HG et al. (2018) **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa. 356 p.

Schreefel L, Schulte RPO, De Boer IJM, Schrijver AP, Van Zanten HHE (2020) Regenerative agriculture—the soil is the base. **Global Food Security** 26: 100404.

Silva FM, Silva SHG, Acuña-Guzman SF, Silva EA, Ribeiro BT, Fruett T, Curi N (2021) Chemical and mineralogical changes in the textural fractions of quartzite-derived tropical soils, along weathering, assessed by portable X-ray fluorescence spectrometry and X-ray diffraction. **Journal of South American Earth Sciences** 112:103634.

Silva JDFF, Júnior JM, da Silva LFV, Chitlhango AP, Silva LS, Teixeira DDB, Alleoni LRF (2023) Magnetic signature and X-ray fluorescence for mapping trace elements in soils originating from basalt and sandstone. **Chemosphere**, 341, 140028.

Silva LS (2016) **Mineralogia da fração argila dos solos do Planalto Ocidental Paulista**. 68f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Unesp, Jaboticabal.

Silva RCD (2016) **Intemperismo de minerais de um remineralizador**. Dissertação (Doutorado em agronomia) Universidade de São Paulo.

Silva WDVR, Silva-Mann R (2020) Agricultura de Precisão no Brasil: conjuntura atual, desafios e perspectivas. **Society and Development** 9 e1979119603-e1979119603.

Silveira CM, Souza GVL, Moura LCB, Malmegrim Junior RN, Santos PHB, Nogueira R, Bizão AA (2021) Aplicação de pó de rocha basáltica (prb) em cultivo de cana de ano. **IV Congresso Brasileiro de Rochagem**. Rio de Janeiro, p. 263-270.

Silveira Toscani RG, Campos JEG (2017). Uso de pó de basalto e rocha fosfatada como remineralizadores em solos intensamente intemperizados. **Geociências** 36: 259-274.

Souto Filho, SN (2016) Nanopartículas, morfologia da nanoestrutura e espectrometria de massa como indicadores da recuperação de um latossolo vermelho. Tese (Doutorado em Agronomia) – Unesp, Ilha Solteira.

Souza Bahia ASR, Marques Jr J, Siqueira DS (2015) Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo, Brazil. **Geoderma regional**, 5, 150-156.

Souza FNS, Oliveira CG, Martins ÉS, Alves JM (2017) Efeitos condicionador e nutricional de um remineralizador de solos obtido de resíduos de mineração. **Agri-Environmental Sciences** 3: 1 - 14.

Souza KXS, et al., (2020) **Agricultura digital: definições e tecnologias**. Embrapa.

Souza MPRD, Bidarra ZS (2022) Política pública de apoio à agricultura digital. **Revista de Política Agrícola**, 31: 18.

Spagnol F, Lajús CR, de Andrade Bellé L, Busnello FJ, Sauer AV, de Oliveira SS, Carlesso LC (2023) Relação entre índice de vegetação da cultura da soja a partir da produção de bioinsumos on farm manejados com pó de rocha basáltica. In.: Lajús CR, Busnello FJ, Sauer AV, Costella MF, Daalcanton CF (Eds.) **Tecnologia e gestão da inovação em sistemas de produção sustentáveis**. Campina Grande: EPTEC, p. 53-79.

Tebar MM, Alovisei AMT, Muglia GRP, Villalba LA, Soares MSP (2021) Efeito Residual do pó de rocha basáltica nos atributos químicos e microbiológicos do solo e no estado nutricional da cultura da soja. **Research, Society and Development** 10, e375101119612-e375101119612.

Teixeira RS, Vendrame PR, Christoni AR, Silva PR (2016) Química e mineralogia de um solo desenvolvido de basalto, coletado através de sondagem SPT. **Boletim de Geografia** 34: 116-126.

Theodoro SH, Leonardo OH (2011) Rochagem: uma questão de soberania nacional. In.: **XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica**. Gramado, RS.

Theodoro SH, Sander A, Barbano DFM, Almeida GR (2021) Rochas basálticas para rejuvenescer solos intemperizados. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 22, n. 37, p. 01-120.

Theodoro SMCH (2000) **A Fertilização da Terra pela Terra: uma alternativa para a sustentabilidade do pequeno produtor rural**. Brasília: Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável, 221p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) - UnB, Brasília.

Theodoro SMDCH, Leonardos OH, Rocha EL, Rego KG (2006) Experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes. **Espaço & Geografia** 9: 263 – 292.

Theodoro SMDCH, Tchouankoue JP, Gonçalves AO, Leonardos OH, Harper J (2012) A importância de uma rede tecnológica de rochagem para a sustentabilidade em países tropicais. **Revista Brasileira de Geografia Física** 1390-1407.

Van Straaten P (2006) Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 78, 731-747.

Weindorf DC, Bakr N, Zhu Y, McWhirt A, Ping CL, Michaelson G, Nuss S (2014) Influence of ice on soil elemental characterization via portable X-ray fluorescence spectrometry. **Pedosphere** 24(1): 1-12.

Writzl TC, Canepelle E, Stein JES, Kerkhoff JT, Steffler AD, Da Silva DW, Redin M (2019) Produção de milho pipoca com uso do pó de rocha de basalto associado à cama de frango em Latossolo. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável** 9: 101-109.

Zhao H, Qiang X, Xu X, Zhang P, Quan C, Chang D, Xu X (2024) Goethite in the Red Clay sequences on the western Chinese Loess Plateau and its responses to the middle Miocene Climate Transition. **CATENA**, 237, 107798.

CAPÍTULO 2 – Remineralizador de basalto: caracterização dos atributos químicos e mineralógicos de solos de diferentes geologias

2.1. Introdução

Os solos agrícolas estão atingindo o limite de sua capacidade produtiva devido práticas intensivas e uso indevido da terra (Zhao et al., 2021; Yang et al., 2021). A adoção de novas tecnologias relacionadas ao solo é fundamental (Padarian et al., 2015), para alcançar altos níveis produtivos (Souza e Bidarra, 2022). Evitando o esgotamento de recursos naturais (solo e água), criando um ambiente sustentável para o cultivo de alimentos (Machado e Rhoden, 2022) e garantindo a segurança alimentar.

Apesar de o Brasil ser um dos maiores fornecedores de alimento do mundo (Ramos et al., 2015), para garantir altas produções, é necessário a importação de fertilizantes para correção dos solos, tornando o país um dos maiores consumidores de fertilizantes (Swoboda et al., 2022). O uso de remineralizadores tem potencial para reduzir a dependência de insumos externos, além de melhorar a fertilidade do solo (Alovisi et al., 2016).

Os “remineralizadores” ou “pó de rocha” podem ser vistos como uma tecnologia alternativa para rejuvenescimento do solo e liberação de nutrientes as plantas de forma lenta, porém contínua, gerando bons resultados durante alguns anos (Conceição et al., 2022; Swoboda et al., 2022). Estes podem ser resíduos de indústrias ou rocha devidamente moída, desde que atendam as especificações da legislação 12.890/2013 (BRASIL, 2013).

O uso de remineralizadores já é relatado desde a década de 1930, quando pesquisadores europeus usaram resíduos de pedreiras de basalto na melhoria de solos degradados para cultivo de árvores florestais (Albert, 1938; Hilf, 1938; Gillman et al., 2001). Esta alternativa pode auxiliar na regeneração de áreas degradadas, na adsorção de íons contaminantes, no sequestro de carbono atmosférico, e como fonte de nutrientes (Ramos et al., 2022), melhora o desenvolvimento das plantas, qualidade e saúde do solo (Swoboda et al., 2022).

Os minerais de silicatos que formam a maioria das rochas (Burbano et al., 2022), durante o processo de intemperismo podem alterar os parâmetros de fertilidade do solo e formar novos minerais secundários (Weerasuriya et al., 1993; Leonardos et al., 2000; Lefebvre et al., 2019). Apesar dos benefícios, o uso de remineralizador apresenta como principal limitação a baixa solubilidade e reatividade das fontes minerais de nutrientes (Tavares et al., 2018; Manning e Theodoro, 2020).

A forma de aplicação de insumo, influência na liberação de nutrientes na solução do solo. A aplicação a lanço, visa a melhoria da qualidade do solo e apresenta eficiência no controle da erosão hídrica (Salomão et al., 2020), o manejo revolvido ocasiona menores perdas em adubação e intensifica cada vez mais a produção (Lajús et al., 2023). O solo é um ambiente vivo que está em constante transformação, desenvolver quaisquer práticas de manejo, é necessário compreender a dinâmica do seu meio e a contribuição da matéria viva para seu desenvolvimento (Moraes, 2021).

Entre os materiais disponíveis, o remineralizador de basalto se destaca, uma vez que o basalto é uma rocha ígnea, de composição máfica, rica em silicatos de magnésio (Mg) e ferro (Fe) e de pH básico (Nichele, 2006) e pode ser fonte também de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e vários micronutrientes (Swoboda et al., 2022). Os minerais que constituem as rochas basálticas têm maiores taxas de dissolução quando comparados com rochas félsicas (Deer et al., 2013).

Entender o comportamento dos minerais do solo após a adição de remineralizadores é um grande desafio. A interação da mineralogia do solo com a mineralogia do remineralizador, ainda é uma grande lacuna na ciência (White e Brantley, 2003; Swoboda et al., 2022). Todavia, busca-se entender se o remineralizador de basalto é capaz de alterar a mineralogia dos solos, proporcionando a formação de novos minerais e liberação de nutrientes. Este estudo teve como objetivo avaliar os atributos químicos e mineralógico do solo de geologia arenítica e basáltica após adição do remineralizador de basalto.

Material e Métodos

2.2.1 Caracterização da área de estudo

O município de Jaboticabal está localizado na região agropecuária centro-norte do estado de São Paulo, com as seguintes coordenadas geográficas (21°14'50"S 48°17'10"W). O clima da região foi classificado, segundo Köepen, do tipo Aw, definido como tropical de verão chuvoso e inverno seco com temperatura variando de 19,1°, no mês mais frio a 24,8° no mês mais quente. A precipitação média é de 1.600 mm por ano, sendo mais concentrada entre os meses de outubro a março e parcialmente seca de abril a setembro.

Os solos do município são classificados como Latossolos Vermelhos, textura média originados de arenito do Grupo Bauru e Latossolos eutróféricos textura argilosa, originados da alteração de basaltos (Formação Serra Geral) subjacentes aos arenitos (Cunha et al., 2005). As amostras de solos foram coletadas em dois pontos na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), na Universidade Estadual "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Jaboticabal - SP.

2.2.2 Caracterização do remineralizador de basalto

O remineralizador escolhido, foi o de basalto, por ser rico em alguns macros e micronutrientes. A caracterização foi de acordo com a Lei 12.890/2013 (Brasil, 2013) atendendo os critérios mínimos para a registro dos remineralizadores conforme a IN 5/2016 (Brasil, 2016), sendo:

- (i) granulometria farelado, pó ou filler;
- (ii) à soma de bases (CaO, MgO, K₂O), deve ser no mínimo a 9%;
- (iii) o teor mínimo de óxido de potássio (K₂O) deve ser de 1%;
- (iv) limites máximos (mg kg⁻¹) de (As<15; Cd<10; Hg<0,1; Pb<200);
- (v) sílica livre (quartzo) < 25%;
- (vi) pH de abrasão conforme declaração do produtor do remineralizador.

A quantificação dos elementos químicos do remineralizador de basalto foi determinada através da leitura no equipamento EFR-x, modelo NexQc sendo operado no intervalo de 0 a 10 Kev. Foram obtidos os valores dos seguintes óxidos: Sódio (Na), Potássio (K), Cálcio (Ca), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Zinco (Zn), Alumínio (Al), Silício

(Si), Titânio (Ti), Magnésio (Mg) e Fósforo (P) a perda por incineração (LOI) foi obtida após a ignição a 1000°C (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização geoquímica dos óxidos de ferro por fluorescência de raios-X.

Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	ZnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	MgO	P ₂ O ₅	LOI	Total
2,33	1,05	11,20	0,14	10,56	0,01	10,78	51,78	1,21	8,98	0,30	1,23	99,57

LOI: Perda pelo fogo

O pH de abrasão foi de 7,21 indicando a neutralidade remineralizador. A granulometria do material classificou-se como pó. A caracterização dos minerais foi realizada por difratometria de raios-X (DRX), no equipamento Mini-Flex II- Rigaku com refinamento de Rietveld, usando o programa PDXL, recomendado pela empresa Rigaku, fabricante do equipamento. A composição do remineralizador é típica de basalto, diópsidio e plagioclásio (Tabela 2).

Tabela 2. Determinação da proporção modal das fases dos minerais cristalinos pelo método de Rietveld por difração de raios-X.

Basalto	Diópsidio	Olivina	Plagioclásio	Ortoclásio	Ilmenita	Total
%	39,5	14,6	35,3	8,6	2,1	100

Diópsidio - $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$, Olivina - $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$, Plagioclásio - $(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8$, Ortoclásio - KAlSi_3O_8 , Ilmenita - Fe_2TiO_3 .

Os picos dos minerais podem ser observados na (Figura 2), o material é caracterizado por apresentar em sua composição: diópsidio (Di), olivina (Ol), plagioclásio (Pl), ortoclásio (Or), Ilmenita (IL). Os picos referentes a caulinita (Ct), gibbsita (Gb), hematita (Hm) e goethita (Gt), foram apenas apontados no difratograma, pois estes são reflexos encontrados nos solos deste estudo.

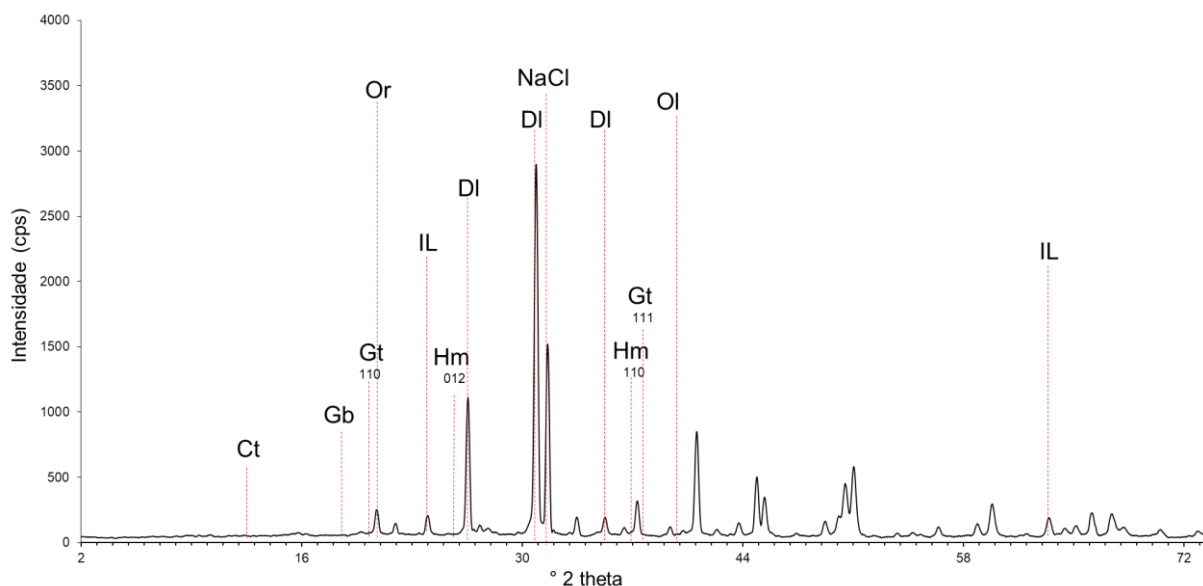


Figura 2: Difratoograma do remineralizador de basalto, com refinamento de Rietveld, usando o programa PDXL, recomendado pela empresa Rigaku, fabricante do equipamento.

Caulinita (Ct), gibbsita (Gb), hematita (Hm), goethita (Gt), ortoclásio (Or), plágioclásio (Pl), cloreto de sódio (NaCl), olivina (Ol), dióxido (Di), Ilmenita (IL).

2.2.3 Coleta e Delineamento Amostral

Foram coletados solos de geologia arenítica e basáltica na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV). Inicialmente removeu-se 5 cm da camada superficial (matéria orgânica) para coleta do solo em área de mata. Os solos foram secos e peneirados em malha de 3x3 mm e colocados em vasos de 1,5 l.

O experimento consistiu em um sistema fatorial 4×2 , sendo testadas três doses do remineralizador (0,4; 0,8 e 1,6 t ha⁻¹) e um controle (sem remineralizador), duas formas de aplicação do remineralizador (revolvido e lanço), e dois solos com geologias arenítica e basáltica que possuem características intrínsecas, não sendo um fator para análise, totalizando 48 vasos (Figura 3).

A água perdida foi repostada a fim de manter a capacidade de retenção de água (CRA) em 50%. As avaliações foram realizadas com 90 dias de experimento, sendo submetido a análises de Difração de Raios-X (DRX), Suscetibilidade Magnética (SM), e química do solo.

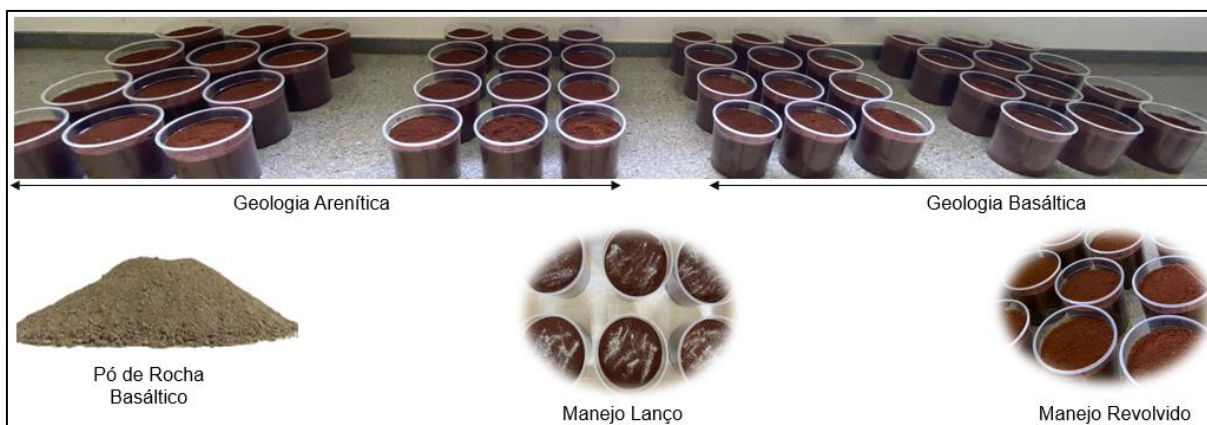


Figura 3: Instalação do experimento.

2.2.4 Análises laboratoriais

2.2.4.1 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (EFRx)

As amostras foram secas, peneiradas com peneiras de malha com diâmetro de 2 mm, pesado aproximadamente 2 gramas de solo e disposto em porta amostra para leitura no equipamento. O sensor EFRx modelo NexQc da marca Rigaku foi calibrado para leitura dos elementos: potássio (K), cálcio (Ca), manganês (Mn), ferro (Fe), zinco (Zn), alumínio (Al), silício (Si), titânio (Ti), magnésio (Mg) e fósforo (P). Para obter uma excitação adequada para uma ampla gama de elemento, o tubo de raios-X Rh foi operado a 15 kV e 50 kV.

A voltagem de 15 kV favorece a fluorescência de elementos na faixa de Na-Sc e 50 kV é mais apropriado para elementos mais pesados na faixa Ti-Fe. Para fins de avaliação da detecção do conteúdo elementar da amostra pela FRX, materiais do solo certificados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), BCR-2, DNC-1, QLO-1a, SDC-1 e W-2A (Flanagan, 1969; Jochum et al., 2016) foram usados para calibrar o equipamento.

2.2.4.2 Suscetibilidade Magnética (SM)

A análise de suscetibilidade magnética (SM) foi determinada na terra fina seca ao ar (TFSA). Pesou-se 10 g de solo em tubo falcon de 50 ml e realizou-se a leitura no equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B de duas

frequências conforme metodologia descrita por Dearing (1994). A variação da frequência depende do χ por unidade de massa ($\chi_{FD}\%$).

Neste estudo foi utilizado duas frequências. A utilização de dupla frequência, baixa ($\chi_{lf} = 0,47$ kHz) e alta ($\chi_{hf} = 4,7$ kHz), devem ser aplicadas em estudos de caráter qualitativo para indicar a presença de minerais magnéticos de domínio simples e múltiplos (Dearing, 1994). Para obtenção de resultados mais precisos em uma única leitura é indicado o uso da baixa frequência.

$$\chi_{FD}\% = (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf} \times 100 \quad (1)$$

2.2.4.3 Análises mineralógicas

Os teores de ferro relativo à totalidade dos óxidos de ferro pedogenéticos extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fe_d) seguiu a metodologia de Mehra e Jackson (1960) e os teores de ferro referentes aos óxidos de ferro pedogenéticos de baixa cristalinidade foram extraídos por solução de oxalato de amônio (Fe_o) seguindo a metodologia de Camargo et al. (1986).

Para análise de Difractometria de Raios-X (DRX) realizou-se a separação da argila da amostra de solo, pelo método de centrifugação (Jackson, 1985). O sensor utilizado para leitura utiliza tubo de cobre e um colimador para evitar distorções de picos. Foi adicionado as amostras um padrão interno conhecido, NaCl. Com base na ocorrência do pico deste padrão, podemos corrigir desvios de posicionamento, ou identificar preparos incorretos na amostra.

Os minerais caulinita (Ct), gibbsita (Gb), goethita (Gt) e hematita (Hm) presente na fração argila foram caracterizados em lâminas confeccionadas com material sem orientação (em pó). A caracterização da Ct e Gb na fração argila foi realizada com a eliminação dos óxidos de ferro pelo método ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) (Mehra e Jackson, 1960), e peneirada em malha de 0,10 mm.

A razão Ct/(Ct+Gb) foi calculada a partir dos reflexos das áreas Ct (001) e Gb (002) dos difratogramas. O Diâmetro Médio do Cristal (DMC) foi calculado a partir da largura à meia altura (LMA) dos reflexos dos minerais Ct (001) e Gb (002), usando a equação de Klug e Alexander (1974).

A Hm e a Gt foram caracterizadas com o tratamento com NaOH 5 mol L⁻¹ (1 g de argila/100 ml solução) para concentração dos óxidos de ferro, segundo Norrish e Taylor (1961) modificado por Kämpf e Schwertmann (1982). Foi adicionado 10% em peso de sílica gel moída, para a manutenção de concentração mínima de ácido silícico na solução de NaOH 5 mol L⁻¹ evitando mudanças na substituição em alumínio e cristalinidade da Gt (Kämpf; Schwertmann, 1982).

Para evitar que a leitura dos difratogramas fosse dificultada pela sodalita, as amostras foram lavadas com solução de HCl 0,5 mol L⁻¹, em agitação por 4 horas. A correção dos desvios no posicionamento (d) dos reflexos estudados foi feita acrescentando às amostras 10% em peso de cloreto de sódio moído e peneirado em malha 0,10 mm, antes de serem difratados.

A razão Gt/(Gt+Hm) se obteve após o cálculo dos reflexos da Gt (110) e Hm (012), posteriormente multiplicou-se a área do pico da Gt (110) por 0,35 devido a Hm (012) apresentar intensidade de 35% (Kämpf e Schwertmann, 1998). O teor de Gt, o teor de Fed foi multiplicado pela razão Gt/(Gt+Hm) e por 1,59. Já para a Hm, multiplicou-se o teor de ferro cristalino por 1,43, após ser subtraído deste valor a quantidade de ferro correspondente à Gt (Dick, 1986), conforme as equações:

$$[(Gt/Gt+Hm)] \times (Fed\%-Feo\%) = \%FeGt; \quad (2)$$

$$FeGt\% \times 1,59 = FeOOH = \%Gt; \quad (3)$$

$$FeGt\% - (Fed\%-Feo\%) = FeHm\%; \quad (4)$$

$$FeHm\% \times 1,43 = Fe_2O_3 = Hm\%. \quad (5)$$

O difratômetro utilizado foi o Mini-Flex II- Rigaku, empregando-se cátodo de cobre com filtro de níquel e radiação α (20mA, 30Kv). A velocidade de varredura empregada foi de 1°2 θ minuto⁻¹ com amplitude de 23 a 49°2 θ para a caracterização da Hm e Gt, e de 11 a 19°2 θ para a caracterização da Ct e Gb. Para a obtenção dos dados utilizou-se o software PDXL (Integrated X-ray powder diffraction software).

2.2.5 Análises Química

As amostras de solo foram coletadas, seca e passadas em peneiras de 2 mm para a quantificação dos nutrientes do solo, foi realizado a análises químicas de rotina proposta por Raij et al. (2001). Sendo analisados potencial hidrogeniônico (pH), acidez

potencial (H+Al), Cálcio (Ca^{2+}), Potássio (K^+), Magnésio (Mg^{2+}) fósforo (P^-). Os atributos capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V%) foram calculados.

2.2.6 Análises Estatísticas

Os dados foram analisados, inicialmente com teste de normalidade, utilizando o Shapiro-Wilk e realizada uma análise fatorial para cada variável, aplicado o teste de Tukey a 5%. Foi realizada análise de regressão para as variáveis com maior significância. A análise multivariada de agrupamento por método hierárquico foi utilizada para discriminar e agrupar as doses e o modo de aplicação do remineralizador.

A análise de agrupamento por método hierárquico é uma técnica multivariada exploratória que tem por finalidade reunir as unidades amostrais em grupos, de tal forma que exista homogeneidade dentro do grupo (similaridades) e heterogeneidade entre eles (dissimilaridades). A estrutura de grupos contida nos dados é vista em um gráfico denominado dendrograma, construído com a matriz de semelhança entre as amostras (Sneath e Sokal, 1973). A matriz de semelhança foi construída com a distância euclidiana e a ligação dos grupos foi feita com o método de Ward. Os Heatmaps foram gerados para a visualização dos agrupamentos por método hierárquico. Todas as análises foram realizadas utilizando o software R (R Development Core Team, 2022), para o Heatmaps utilizou-se o pacote gplots.

2.3 Resultados e Discussões

2.3.1 Caracterização química dos solos

Os atributos químicos avaliados diferiram estatisticamente em função das doses e modo de aplicação do remineralizador nas geologias dos solos de arenito e basalto. O aumento das doses ocasionou o aumento linear do pH, variando de 5,33 - 5,75 nos solos areníticos com ($R^2 = 0,87$) e de 6,70 – 6,89 nos solos basálticos com ($R^2 = 0,59$). Observa-se correlação linear positiva entre as variáveis pH, SB, V% e as

doses do remineralizador de basalto, exceto para a acidez potencial (H+Al). A H+Al nos solos de arenito variou de (25,09 – 18,07 mmolc dm³) com ($R^2 = 0,72$) e, nos solos basálticos (13,67 – 12,65 mmolc dm³) com ($R^2 = 0,84$) (Figura 4). O tratamento que mais contribuiu para redução da H+Al no solo foi 1,6 t ha⁻¹ (MR) para ambos os solos (Figura 4). Vale ressaltar, que a acidez do solo é uma das principais limitações química que afeta a produtividade das culturas.

A SB nos solos de geologia arenítica variaram de (47,44 – 50,61 mmolc dm³) com ($R^2 = 0,40$) e V% de (65,32 – 72,45 mmolc dm³) com ($R^2 = 0,84$). Os solos de geologia basáltica também apresentaram variabilidade, a SB foi de (61,95 – 67,63 mmolc dm³) ($R^2 = 0,74$) e V% (81,81 – 84,1 mmolc dm³) ($R^2 = 0,88$) com a elevação das doses (Figura 4). O aumento dos nutrientes na solução do solo pode estar relacionado a dissolução do remineralizador de basalto.

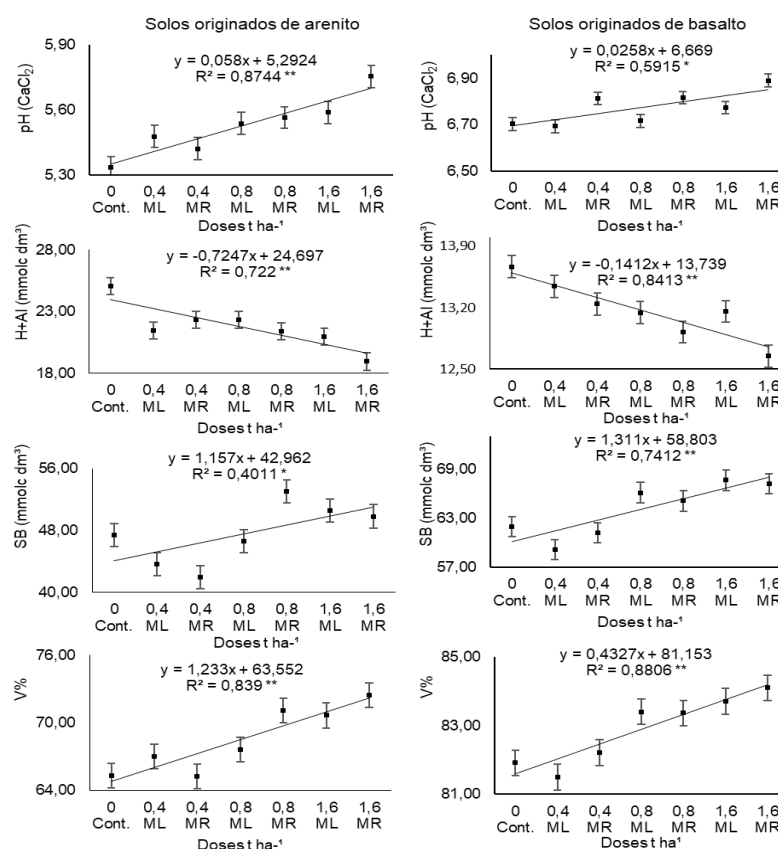


Figura 4: Acidez ativa - pH, Acidez Potencial - H+Al, Soma de Bases SB (mmolc dm³) e Saturação por Bases (V%) em solos de geologia arenítica e basáltica após 90 dias de incubação do remineralizador de basalto.

******, ***** e **ns** – Significativo a 1%, 5% de probabilidade.

A forma de manejo pode ter influenciado nos atributos químicos dos solos das geologias estudadas. Observa-se que o manejo revolvido (MR), apresentou maior interação na solução do solo, comparado ao manejo lanço (ML). A correção da acidez e a disponibilização dos nutrientes em um período de 90 dias mostra o potencial na utilização desse recurso nos solos tropicais, apesar das doses terem sido relativamente baixa quando comparada à de outras pesquisas (Webers et al., 2023; Bono e Assis, 2023; Hanisch et al., 2013; Theodoro et al., 2012) podemos observar alterações significativas.

Mensurar o pH do solo após a adição do remineralizador é indispensável. As condições de um solo ácido, neutro ou alcalino são definidas de acordo com a escala de pH do solo (Silva et al., 2021). Nos solos tropicais, a fertilidade depende da correção do pH, onde a neutralização dos efeitos tóxicos do Al, altera a disponibilidade de macro e micronutrientes (Van Raij 2011). Conceição et al. (2022) testando remineralizador de basalto em 90 dias, em solos de textura arenosa e média, verificaram que a dose de 8 t ha⁻¹ aumentou os valores de SB e V% em 200%. Souza (2022), observou em sua pesquisa que a adição do remineralizador de basalto reduziu o H+Al, melhorando os índices de SB e propiciando o aumento do V%.

Nos solos areníticos (Figura 5) nota-se que o tratamento 0,8 t ha⁻¹ (MR) foi a que mais contribuiu para a elevação dos valores médios do Ca²⁺ (31,16 – 34,27 mmol_c dm³), SB (47,44 – 53,09 mmol_c dm³) e CTC (72,53 – 74,51 mmol_c dm³). Para as variáveis Mg²⁺ e K²⁺ foi o tratamento 1,6 t ha⁻¹ (ML), com (13,68 – 16,78 mmol_c dm³) e (2,60 – 2,87 mmol_c dm³) respectivamente. O fósforo (P) apresentou redução em todos os tratamentos de (14,57 – 11,25 mmol_c dm³) para o tratamento 1,6 t ha⁻¹ (MR), reduzindo em 22,79% a concentração de P no solo corrobora com resultados da mineralogia nesse mesmo tratamento.

A média da CTC (75,63 – 80,79 mmol_c dm³), SB (61,95 – 67,63 mmol_c dm³), Ca²⁺ (40,8 – 47,81 mmol_c dm³), K²⁺ (3,34 – 3,76 mmol_c dm³), aumentaram em 6,4%, 8,40% e 13,85% respectivamente, para o tratamento 1,6 t ha⁻¹ (MR) quando comparada ao controle para os solos de geologia basáltica. O Mg²⁺ apresentou diminuição com o aumento das doses (Figura 5), o tratamento que mais reduziu este nutriente foi o 0,4 t ha⁻¹ do remineralizador de basalto com 14,13%. Tal redução do

Mg²⁺ após 90 dias pode ser associada a ocorrência de substituições isomórficas (Dixon e Weed, 1989) e/ou balanço de carga do solo pode ter influenciado.

Hanisch et al. (2013) avaliando o efeito de doses de basalto na produtividade na cultura do milho, utilizaram 0, 2, 4, 8 e 12 t ha⁻¹, e verificaram o aumento nos teores de P, Cu, Mn e Fe, porém redução no teor de Mg²⁺. Os autores não atribuíram justificativas a redução do elemento. O comportamento de adsorção e dessorção estão altamente correlacionados com as propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo (Jing et al., 2024), é um aspecto chave para analisar o comportamento dos elementos. Melo et al. (2012) verificaram o efeito do remineralizador de basalto após um ano de incubação em um Latossolo Amarelo Distrófico. Os autores apontam que ocorreu aumento do valor de pH de acordo com acréscimos das doses, alcançando a neutralização com a dose de 50 t ha⁻¹. Além disso, as concentrações de Ca²⁺ e Mg²⁺ foram relativamente mais baixas.

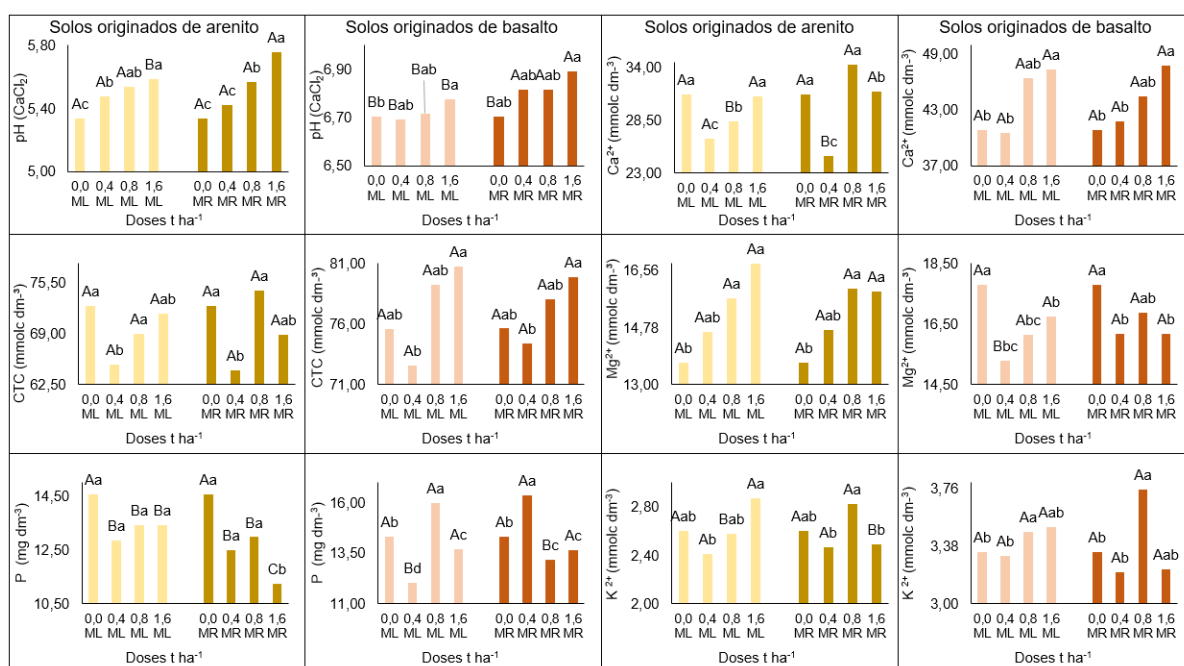


Figura 5: Atributos químicos do solo de geologia arenítica e basáltica após a adição do remineralizador de basalto.

Média seguidas pela mesma letra maiúscula no tratamento manejo e minúscula no tratamento dose não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. *Manejo Lanço- ML, Manejo Revolvido- MR, Acidez ativa- pH CaCl₂, Cálcio- Ca, Capacidade de Troca de Catiônica- CTC, Magnésio- Mg, Fósforo – P e Potássio- K.

Avaliando o efeito residual do remineralizador de basalto, Alovisei et al. (2021) constataram a redução das concentrações de P, Cu e Zn na folha da soja. A

diminuição dos elementos de acordo com os mesmos autores é causada pelo efeito da dissolução. Nos solos, a dissolução mineral aumenta pelo desequilíbrio que ocorre com a solução do solo e as superfícies minerais através da remoção de íons por processos como lixiviação e absorção de nutrientes (Pádua, 2012). Alovisei et al. (2017) aponta que teor de P no solo aumentou linearmente com o acréscimo das doses aplicadas de remineralizador de basalto até os 30 dias, com posterior redução após esse período.

Burbano et al. (2022) testaram cinco insumos, dentre a rocha britada de basalto como remineralizador em um Latossolo Vermelho distrófico e concluíram que o uso deste material proporcionou ao solo aumento do teor de Ca e Mn na parte aérea das plantas. Kelland et al. (2020) utilizaram basalto triturado e verificaram a resposta da cultura do sorgo em 120 dias de experimento, com aumento da produtividade.

O uso de remineralizador nos solos melhora a fertilidade do solo, nutrição de plantas (Burbano et al., 2022; Manning e Theodoro, 2020; Brito et al., 2019; Cola et al., 2012; Melo et al., 2012; Theodoro et al., 2006) saúde, qualidade do solo e produtividade da cultura (Theodoro et al., 2006; Ribeiro et al., 2010; Brandão, 2012; Theodoro et al., 2012; Souza, 2014).

Apesar da aplicação dos mesmos tratamentos (dose x manejo) para ambos os solos estudados, o solo de origem basáltica teve maior interação com os tratamentos submetidos, podendo estar relacionada com a maior atividade na fração argila. O tipo de rocha, a composição mineralógica, a vida microbiana e o relevo, exercem grande influência na estabilidade/instabilidade das rochas e minerais (Cola e Simão, 2012).

2.3.4 Caracterização geoquímica

Na (Figura 6) pode-se observar a porcentagem de óxidos nos solos areníticos e basálticos. Nos solos areníticos, as variáveis: óxido de cálcio (CaO), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3) se diferenciaram estatisticamente. A dose de $1,6 \text{ t ha}^{-1}$ (MR) para a CaO apresentou 13% de aumento no solo, houve também aumento para SiO_2 e Fe_2O_3 com a dose de $0,4 \text{ t ha}^{-1}$ (MR). Nos solos de geologia basáltica apenas o CaO não diferiu significativamente em

função das doses e modo de aplicação do remineralizador. O manejo revolvido tendeu a diminuir a Fe_2O_3 , SiO_2 e Al_2O_3 , implicando diretamente na concentração dos óxidos.

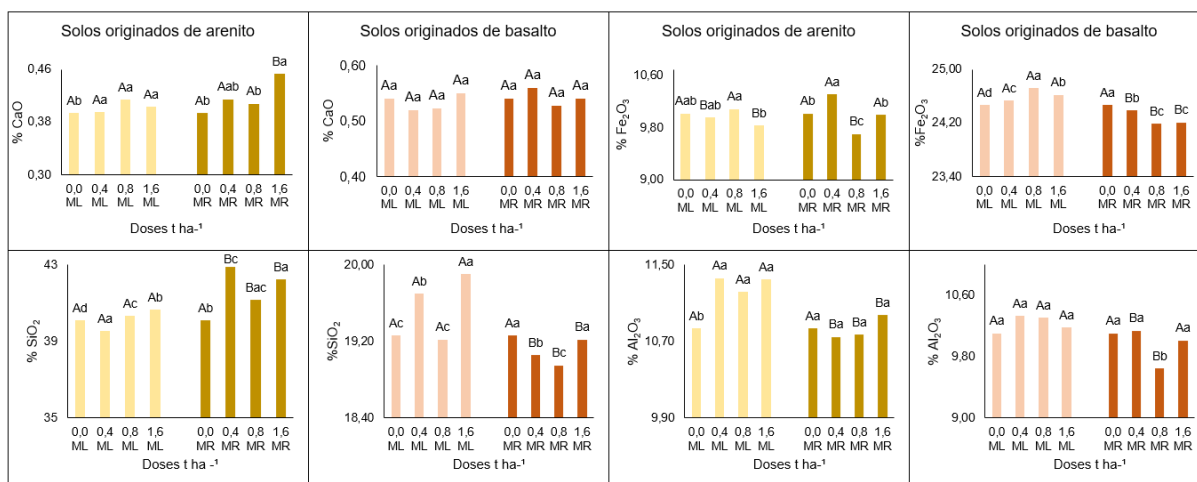


Figura 6. Conteúdo oxídico para os solos de origem arenítica e basáltica estimada pela EFRx.

Média seguidas pela mesma letra maiúscula no tratamento manejo e minúscula no tratamento dose não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO_2), óxido de ferro (Fe_2O_3), magnésio (MgO), após a adição do remineralizador de basalto.

As concentrações de Si solúvel no solo e extraível, são influenciadas pelo pH (Lisztes-Szabó et al., 2020). O manejo químico afeta sua solubilidade (Camargo et al., 2007). A adsorção de Si em óxidos de Fe e hidróxidos de Al amorfos também está associada à preferência dos isótopos de Si leve na fase de Si adsorvido (Steinhoefel et al., 2017). Os elementos disponíveis na matriz mineral, quando aplicado ao solo é dependente da reatividade das fases minerais presente na rocha (Medeiros et al., 2021). Os benefícios da aplicação de rocha moída aos solos, como remineralizadores estão relacionados à disponibilidade de nutrientes (macro e micro).

Mafra et al. (2001) estudando a caracterização e interpretação dos atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos de arenito, descreveu que os teores de ferro são baixos, refletindo o baixo teor deste elemento no material de origem. O Si foi reconhecido como nutriente valioso na produção agrícola devido ao fato de proporcionar as plantas maior resistência a estresses bióticos e abióticos e promover vários processos fisiológicos benéficos (Kovács et al., 2022).

2.3.1 Caracterização mineralógica dos solos

Na fração argila, a caulinita (Ct) destaca-se dentre os minerais silicatados. As argilas não silicatadas, gibbsita (Gb) e a goethita (Gt) são óxidos hidratados de Al e Fe, respectivamente. O mineral de óxido de ferro não hidratado, hematita (Hm) são encontrados frequentemente nos solos tropicais (Novais e Mello, 2007). Os difratogramas dos minerais Hm, Gt, Ct e Gb sem a adição do remineralizador de basalto são ilustrados na (Figura 7).

Para a fração de argila desferrificada nos solos de geologia arenítica a Ct é mais expressiva, já nos solos de geologia basáltica é a Gb. Estudos caracterizando essas geologias já demonstraram a predominância nos solos areníticos da Ct e da Gb em solos de origem basáltica (Cunha et al., 2005; Fernandes et al., 2020). Para a fração argila com óxidos concentrados, os picos da Hm e Gt são visualmente melhor definidos nos solos de geologia basáltica (Figura 7) pois solos de origem de basalto apresentam teores de ferro maiores que os de origem de arenito.

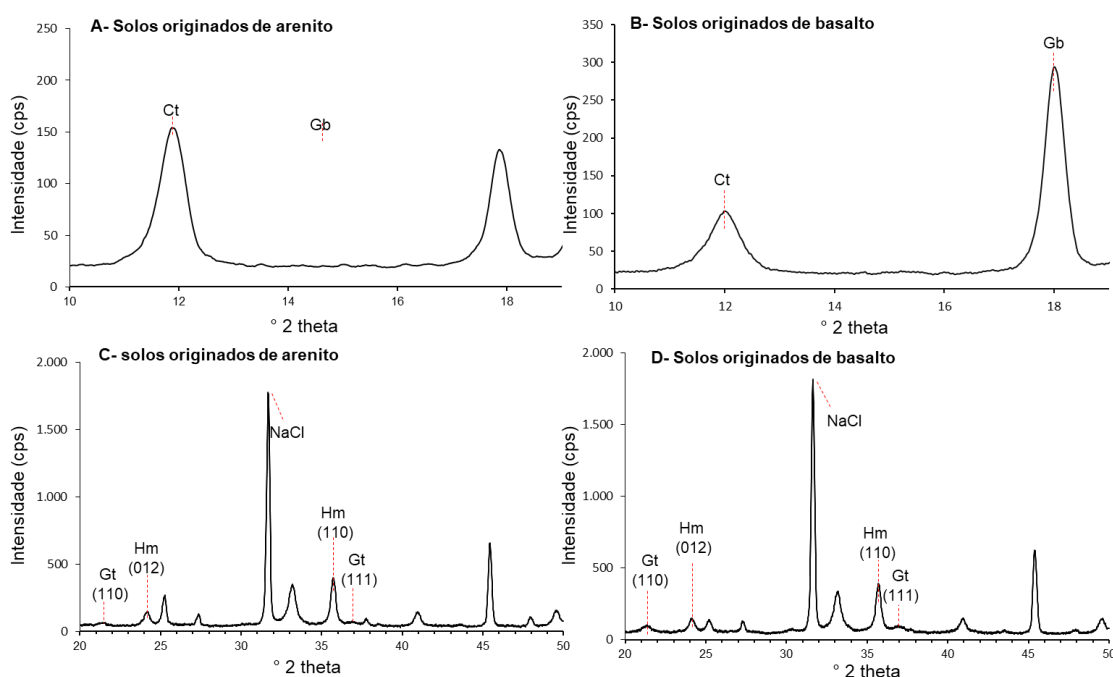


Figura 7: Difratogramas de raios-X dos minerais da fração argila dos solos de geologia arenítica e basáltica. Ct – caulinita, Gb – gibbsita, Gt – goethita, Hm - hematita.

Os solos de geologia arenítica e basáltica apresentaram respostas diferentes em função das doses e do modo de aplicação do remineralizador de basalto, quando analisados os atributos mineralógicos (Figuras 8 e 10). Na fração argila dos solos, os

difratogramas mostram a presença dos minerais Ct, Gb, Gt e Hm em todos os tratamentos. Pode-se observar que a adição do remineralizador de basalto alterou o padrão de ocorrência dos picos dos minerais, que já se encontravam nos solos (controle). A remoção dos óxidos de ferro, nos solos de geologia arenítica aponta que os conteúdos de Ct são maiores que de Gb, os tratamentos de 0,8 t ha⁻¹, 1,6 t ha⁻¹ (ML) e 0,4 t ha⁻¹ (MR) alteraram expressivamente os picos da Ct. Nos solos basálticos é notório que o mineral Gb é mais expressivo que a Ct (Figura 8).

As condições da formação dos minerais podem alterar a cela unitária e sua substituição pelo Al e/ou outras propriedades cristaloquímicas (Kämpf e Schwertmann 1998). O aumento da gibbsita diminui a atividade do Al em solução. Por outro lado, o aumento da caulinita aumenta o Al em solução (Mello e Perez, 2009). A formação da Gb nos solos requer uma rápida dissolução nas etapas iniciais do intemperismo do aluminosilicatos e o intenso e lento intemperismo, incluindo a dissolução da Ct (Soares, 2020). A dissolução de minerais primários e reprecipitação do Si e Al, a partir da solução o solo, é o principal processo para a formação da Ct (Melo e Wypych, 2015).

As mudanças observadas nos picos no difratograma (Figura 8) podem ser devido a forma morfológica do mineral do solo, tamanho do domínio, substituições nas estruturas e a concentração dos minerais. Nos solos de basalto, o pico da Ct tende a diminuir a intensidade, enquanto da Gb tende a aumentar (Figura 8). Isso nos remete a ação do intemperismo, onde o basalto é muito mais fácil ser intemperizado que o arenito. Além disso, a maior quantidade de silício pode diminuir a formação de gibbsita no processo de intemperismo do arenito, também corroborada pela presença de minerais mais difíceis de serem intemperizados.

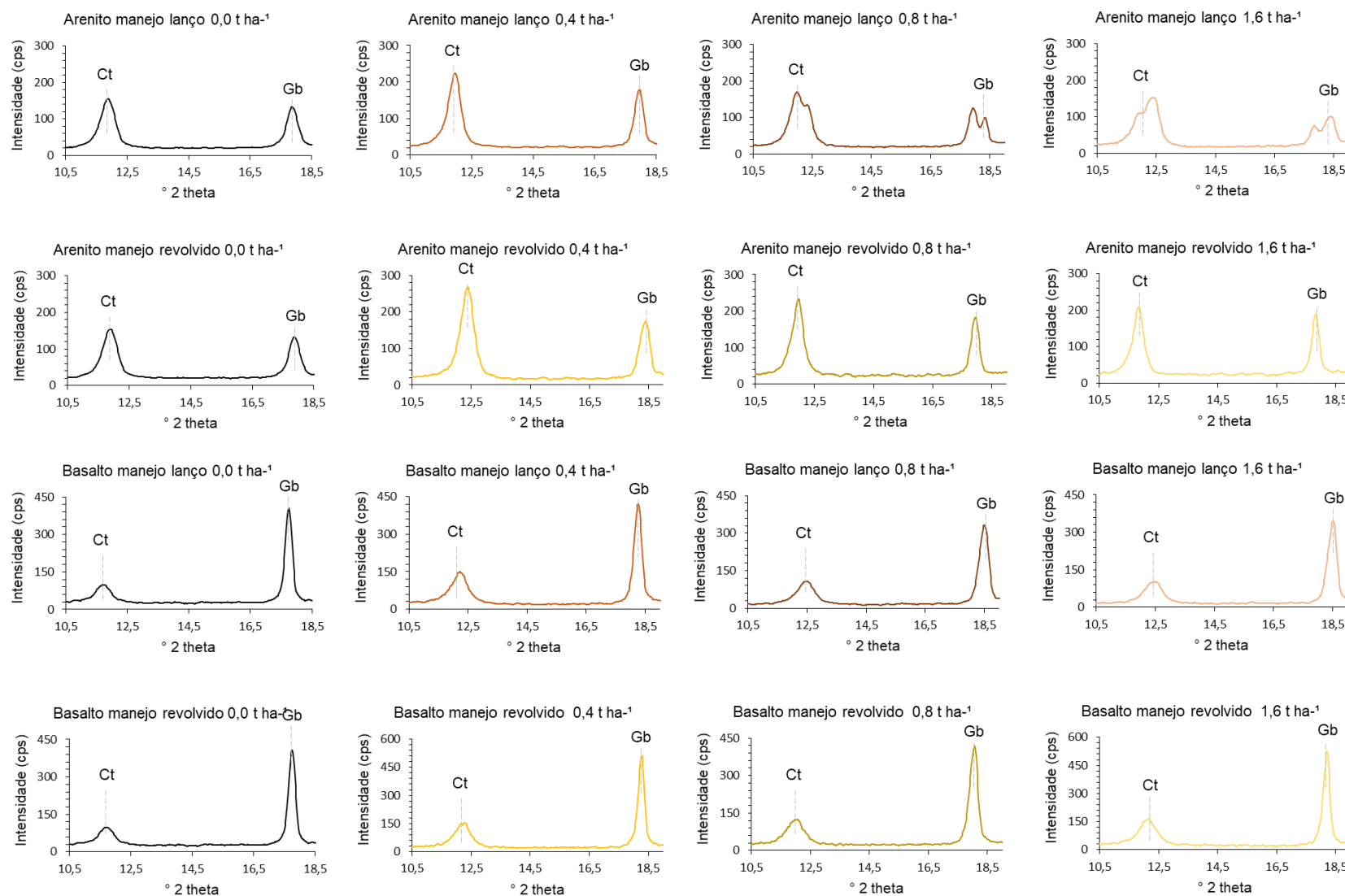


Figura 8. Difratomogramas de raios-X dos minerais caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) da fração argila após a remoção dos óxidos de ferro dos solos originados de geologia arenítica (A) e basáltica (B), após a adição do remineralizador de basalto.

Resende et al. (2011) discutem o aspecto geral a Ct originada em solo de basalto por apresentar menor cristalinidade e picos mais largos. Solos onde existe maior conteúdo de óxidos de ferro ocorrem a presença de Ct menos cristalina (Murray e Lyons 1960; Bundy et al., 1966). Jones e Malik (1994) apontam que cristais de menor cristalinidade tendem a aumentar a cauda quando se observa os picos no difratograma. A tendência em solos férricos é favorecer a formação da Gb, a exemplo de solos derivados de basalto (Resende, 1976; Resende et al., 2011). A liberação de óxidos de Fe no sistema pode adsorver a sílica, dificultando a formação da Ct (Jones e Handresck, 1963).

Para o entendimento das distorções foram realizadas leituras em amostras sintéticas em diferentes proporções da Hm e Gt, na (Figura 9) observa-se que conforme a quantidade de Hm aumenta os picos referente ao óxido também aumentam a intensidade, o mesmo comportamento também é observado para a Gt. Gt. Resende et al. (2011) explicam que os picos de um mineral, como da Hm (104) pode ser realçado pelo pico de outro mineral, como da Gt (130). Esta última sobreposição, por exemplo incentiva o uso de picos de menor intensidade, ou mais discretos.

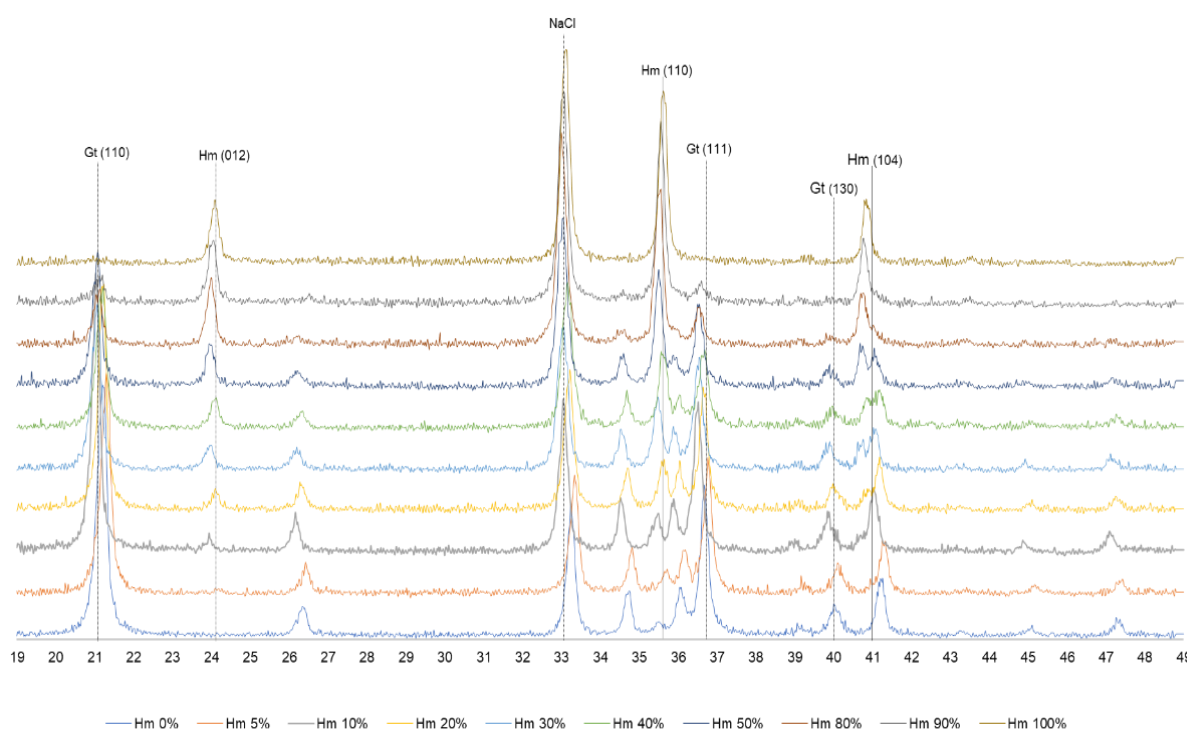


Figura 9. Padrão dos picos dos materiais sintéticos hematita - Hm e goethita – Gt.

Para a concentração dos óxidos de ferro (Figura 10), observa-se modificações nos picos de Gt e Hm. Conforme foram adicionadas as doses do remineralizador de basalto os reflexos referentes a Hm (110) e (104) tenderam a diminuir e os reflexos da Gt (111) e (130), que ocorrem próximos aos reflexos da Hm, tenderam a aumentar. O aumento da intensidade no pico de Gt pode estar associada na adsorção do Fósforo (P). Fernández et al. (2008) verificou em sua pesquisa que a capacidade máxima de adsorção de P dos solos mostrou-se mais dependente da Gt (com 71% de contribuição para seu valor).

Ao observar os difratogramas experimentais para óxidos de ferro (Figura 9) observa-se resultados semelhantes ao que acontece com os difratogramas das curvas deste experimento (Figura 10). Conforme foi adicionando o remineralizador de basalto o pico da Hm foi aumentando a intensidade, enquanto da Gt foi diminuindo. Os reflexos da Hm (012) e (110) e Gt (110) e (111) são os utilizados para cálculos de cristalinidade do material, por serem mais intensos. Porém a mesma observação pode ser realizada quando olhamos os reflexos da Hm (104) e Gt (130). O uso do remineralizador de basalto aumentou a intensidade da Hm, e diminuiu a Gt (Figura 10).

Nos difratogramas do solo de originado de basalto (Figura 10) os picos referentes a Gt (110) diminuem a intensidade, enquanto os referentes a Gt (111) aumentam a intensidade, conforme aumento na dose do remineralizador de basalto. Para os solos de arenito o pico da Hm (110) permanece, porém vai diminuindo a intensidade enquanto aumenta a intensidade da Gt (111). A adição de remineralizador de basalto provocou um desequilíbrio físico-químico no meio, que alterou a dinâmica mineralógica do solo.

A ocorrência da Hm e Gt é expressa por transformações onde $Gt = Hm + H_2O$, por desidratação e o inverso por hidratação (Tardy e Nahon, 1985; Beauvais e Tardy, 1991; Kämpf e Curi, 2000). A Gt tem preferência para neoformação em ambientes com íons de Fe^{3+} em solução, via processo de nucleação-crescimento e cristalinidade do mineral (Kämpf et al., 2000). Portanto sua nucleação e crescimento ocorre via solução o que a torna mais susceptível as variações desta fase, quando comparada com a Hm.

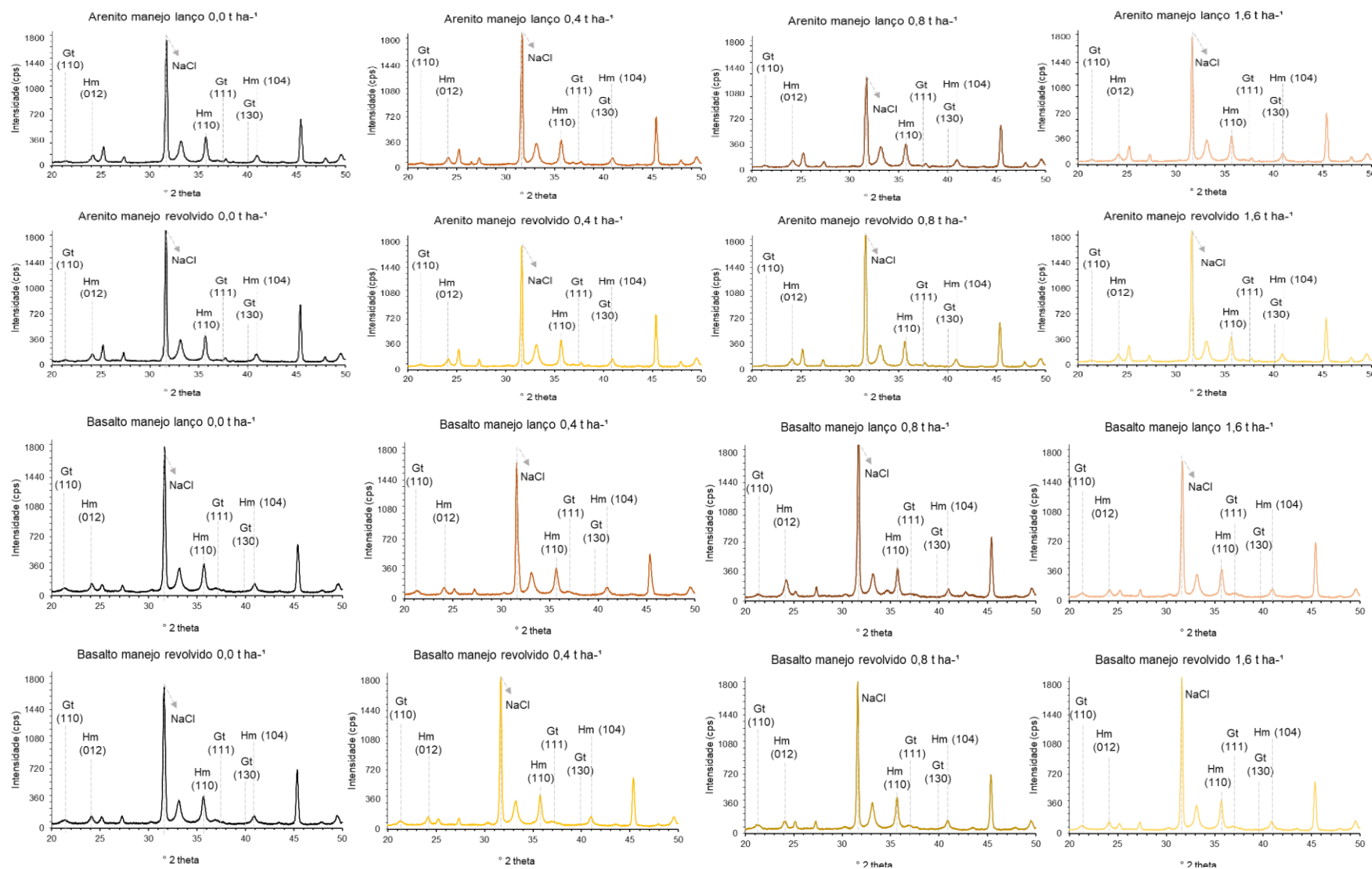


Figura 10. Difratomogramas de raios-X dos minerais goethita (Gt) e hematita (Hm) da fração argila após a concentração dos óxidos de ferro dos solos de geologia arenítica (A) e basáltica (B), com a adição do remineralizador de basalto.

Em condições de não-equilíbrio do ambiente pedogênico, a formação e distribuição destes óxidos pode não seguir os padrões da termodinâmica clássica (Kämpf e Curi, 2000). Portanto o uso de remineralizador de basalto pode afetar sua dinâmica, estabilidade e cristalinidade. Alguns estudos apontam que a mineralogia ainda é uma questão negligenciada, quando se discute o uso dos remineralizadores (White e Brantley, 2003; Swoboda et al., 2022). A dissolução dos minerais da rocha só irá acontecer quando houver desequilíbrio iônico entre a superfície do mineral e a solução do solo (White e Brantley, 2003).

Regiões onde tem muitos reflexos de minerais próximos pode causar a sobreposição dos picos, que pode dificultar a interpretação e indexação de padrões (Bish, 1993). As transformações que ocorrem na Hm e Gt, e a identificação de seus reflexos nos difratogramas, pode ser mais bem compreendida quando consideramos sua estrutura octaedral. O elemento O, comum aos óxidos, são paralelos ao plano basal (Brown, 1980), podendo dificultar a identificação dos óxidos aqui estudados.

Para os minerais Ct e Gb observou-se picos mais alargados e distorcidos da Gb, que podem ser resultantes da substituição isomórfica do Al nos óxidos de ferro (Jones e Malik, 1994). Embora a argila seja tratada, a substituição do Al ou Si por outros íons, podem influenciar a aparência do pico. De acordo com Brown (1980) a Gb menos cristalina tem os reflexos mais amplos e mal definidos.

As quantidades de Ct, Gb, Hm e Gt podem variar de acordo com o material de origem, intensidade de intemperismo, condições de drenagem (Schaefer et al., 2008) e condições ambientais dominantes (Resende et al., 2011). O tipo e o grau de desintegração de um mineral são controlados pela composição da solução do solo e sua interação com o ambiente circundante a qual está sendo exposto (White et al., 2015).

Os minerais são considerados potencialmente instáveis quando expostos a condições atmosféricas, sendo vulneráveis a ação da água, oxigênio, dióxido de carbono e reações exotérmica (Lacerda et al., 2001). A modificação do pico pode estar associada a alteração estrutural do mineral. A intensidade das radiografias difratadas podem ser alteradas por diversos fatores (Moore e Reynolds, 1989), incluindo a quantidade da fase de difração na amostra (Silva et al., 2021).

Han-Jing et al. (2021) identificaram que o aumento da temperatura e da precipitação intensifica o intemperismo químico do silicato. Estes autores verificaram que o tipo de arenito muda de uma transição de arenito feldspato dominado por plagioclásio (glacial, árido-semi-árido) para arenito sub-feldspato dominado por feldspato potássico (temperado, subtropical, tropical). Estudando o intemperismo do basalto promovido pela rizosfera do milho, Krahel et al. (2020) verificou a presença de esmectita em diferentes proporções, com deslocamento do pico d001 (15,9 Å) para (17,7 Å).

A relação entre os valores de Feo/Fed extraído com ditionito-citrato bicarbonato e oxalato ácido de amônio é estudada como um índice qualitativo do grau de cristalinidade dos óxidos (Kämpf, 1988; Kämpf, 2000), indicando se os óxidos estão bem ou mal cristalizados, constituindo um índice de intemperismo do solo (Vendrame et al., 2011). Quando a relação é igual ou maior que 1, os óxidos de ferro são mal cristalizados ou amorfos (solo jovem) e o inverso para solos mais desenvolvidos ou mais intemperizados (Prado e Prado, 2022).

Nos solos areníticos, o manejo não diferiu estatisticamente, somente as doses, variando (0,025 – 0,038 g kg⁻¹). Nos solos de geologia basáltica o tratamento 0,8 t ha⁻¹ (MR) foi de (0,049 g kg⁻¹), comparando com a testemunha a redução foi de 0,03 g kg⁻¹ (Tabela 3). De modo geral, os resultados encontrados neste estudo demonstraram que a variável feo/fed apresenta minerais mais cristalizados, e observa-se que após a adição do remineralizador de basalto nos solos areníticos o remineralizador pode ter contribuído para aumento dessa relação em 34% para a dose 8 t ha⁻¹.

A suscetibilidade magnética (x_{FD}) para a geologia arenítica, a dose dentro do manejo apresentou diferença significativa apenas para o ML, a dose 0,4 t ha⁻¹ foi a que mais se diferiu das demais apresentando 7,50 %x_{FD}. No solo de geologia basáltica no ML a dose 0,8 t ha⁻¹ foi a única que se diferiu, apresentando 5,07 %x_{FD}, no MR foi a dose 1,6 t ha⁻¹ com 6,02 %x_{FD} (Tabela 3).

O aumento da SM nos solos basálticos está associado ao aumento da Ct (Al₂Si₂O₅(OH)₄) um mineral diamagnético. Os principais fatores que influenciam o magnetismo de um mineral é o tamanho da partícula e a substituição isomórfica (Costa e Bigham, 2015). A substituição do Fe por um elemento diamagnético (Al, Mg, Zn,

etc.) diminui o grau de magnetização do mineral (Coey, 1988). A baixa taxa de dissolução de muitas rochas de silicato como remineralizador é um grande obstáculo, porém podem ser melhorados com modificações físicas, químicas ou biológicas (Swoboda et al., 2022).

Tabela 3. Análise de variância para os atributos do solo de geologia arenítica e basáltica dos manejos em função das doses.

Geologia Arenítica						Geologia Basáltica				
Feo/Fed (g kg ⁻¹)						Feo/Fed (g kg ⁻¹)				
Manejo	0,0 t ha ⁻¹	0,4 t ha ⁻¹	0,8 t ha ⁻¹	1,6 t ha ⁻¹	Média	0,0 t ha ⁻¹	0,4 t ha ⁻¹	0,8 t ha ⁻¹	1,6 t ha ⁻¹	Média
ML	0,025	0,030	0,033	0,033	0,03 A	0,079 Aa	0,050 Ba	0,071 Aba	0,069 Aba	0,067
MR	0,025	0,030	0,042	0,039	0,03 A	0,079 Aa	0,064 Aba	0,049 Bb	0,057 Ba	0,062
Méd.	0,025 c	0,030 bc	0,038 a	0,036 ab		0,079	0,057	0,060	0,063	
Análise da variância (F)						Análise da variância (F)				
Dose	6,49 **					6,93 **				
Manejo	3,54 ns					1,79 ns				
D*M	1,45 ns					4,12 *				
CV%	13,78					14,26				
%xFD						%xFD				
Manejo	0,0 t ha ⁻¹	0,4 t ha ⁻¹	0,8 t ha ⁻¹	1,6 t ha ⁻¹	Média	0,0 t ha ⁻¹	0,4 t ha ⁻¹	0,8 t ha ⁻¹	1,6 t ha ⁻¹	Média
ML	9,57 ABa	7,50 Cb	8,50 BCa	10,54 Aa	9,03	8,19 Aa	9,26 Aa	5,07 Bb	7,68 Aa	7,55
MR	9,57 Aa	8,89 Aa	9,53 Aa	8,44 Ab	9,11	8,19 Aa	8,85 Aa	8,63 Aa	6,02 Bb	7,92
Méd.	9,57	8,20	9,01	9,49		8,19	9,06	6,85	6,85	
Análise da variância (F)						Análise da variância (F)				
Dose	5,13 *					13,12 ***				
Manejo	0,086 ns					1,52 ns				
D*M	7,99 **					13,97 ***				
CV%	7,51					9,48				

** significativo a 1%. Média seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Ferro oxalato (feo), ferro ditionito (fed), Suscetibilidade Magnética %xFD.

Parte dos nutrientes contidos no remineralizador acabam ficando aprisionada na matriz sólida das partículas rochosas, levando anos para se solubilizar de forma natural no solo (Marchi et al., 2020). De acordo com os mesmos autores, após a aplicação do remineralizador no solo, podem apresentar efeitos residuais. Salientam que é importante conhecer a solubilidade e a disponibilidade desses elementos as plantas.

Nos solos de geologia arenítica ocorreu o aumento da variável Gt/(Gt+Hm) e em contrapartida a diminuição da Ct/(Ct+Gb) após a adição do remineralizador de basalto. O aumento da razão Gt/(Gt+Hm) (Tabela 4) mostra que ocorre a predominância da Gt confirmando os resultados do difratograma (Figura 10), onde os reflexos são apresentam picos maiores. O tratamento 1,6 t ha⁻¹ (ML) aumentou a razão

em 42%. O aumento fez com que diminuísse a SM, devido a Goethita α -FeOOH ser um mineral classificado como antiferromagnético (Dearing, 1994).

No solo basáltico para a variável Gt/(Gt+Hm) não se diferenciou como o tratamento manejo. O tratamento 0,4 t ha⁻¹ (ML) inferiu na Ct/(Ct+Gb) com aumento de 28% (Tabela 4). Os valores das razões, variam de 0 a 1, quanto mais próximo de 1, maior a predominância de Ct, e quanto mais próximo de 0, maior a predominância de Gb (Fernandes et al., 2020).

Tabela 4: Análise de variância da razão dos minerais Goethita e Hematita, Caulinita e Gibbsita para os atributos do solo de geologia arenítica e basáltica dos manejos em função das doses.

Geologia Arenítica						Geologia Basáltica				
Razão Gt/(Gt+Hm)						Razão Gt/(Gt+Hm)				
Manejo	0,0 t ha ⁻¹	0,4 t ha ⁻¹	0,8 t ha ⁻¹	1,6 t ha ⁻¹	Média	0,0 t ha ⁻¹	0,4 t ha ⁻¹	0,8 t ha ⁻¹	1,6 t ha ⁻¹	Média
ML	0,15 Ac	0,15 Bc	0,20 Ab	0,26 Aa	0,19	0,19	0,32	0,17	0,22	0,22 A
MR	0,15 Ac	0,20 Aab	0,19 Ab	0,23 Ba	0,20	0,19	0,36	0,21	0,23	0,24 A
Méd.	0,15	0,18	0,2	0,24		0,19 b	0,34 a	0,19 b	0,23 b	
Análise da variância (F)						Análise da variância (F)				
Dose	54,86 ***					51,04 ***				
Manejo	1,26 ns					4,31 ns				
D*M	11,10 ***					0,78 ns				
CV%	6,58					10,48				
Razão Ct/(Ct+Gb)						Razão Ct/(Ct+Gb)				
Manejo	0,0 t ha ⁻¹	0,4 t ha ⁻¹	0,8 t ha ⁻¹	1,6 t ha ⁻¹	Média	0,0 t ha ⁻¹	0,4 t ha ⁻¹	0,8 t ha ⁻¹	1,6 t ha ⁻¹	Média
ML	0,67 Aa	0,67 Aa	0,66 Aa	0,69 Aa	0,67	0,31 Ac	0,43 Aa	0,34 Ab	0,33 Bbc	0,35
MR	0,67 Aa	0,60 Bc	0,65 Aab	0,61 Bbc	0,63	0,31 Ab	0,35 Ba	0,30 Bb	0,38 Aa	0,34
Méd.	0,67	0,64	0,65	0,65		0,31	0,39	0,32	0,36	
Análise da variância (F)						Análise da variância (F)				
Dose	3,76 *					46,00 ***				
Manejo	27,27 ***					12,90 ***				
D*M	6,39 **					26,30 ***				
CV%	2,81					3,79				

** significativo a 1%. Média seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Goethita - Gt, hematita - Hm, caulinita - Ct, gibbsita - Gb.

Pesquisas com período de observação maior que 90 dias são necessárias para observar o comportamento desses minerais. Swoboda et al. (2022), sugerem avaliação de efeitos cumulativos e potenciais co-benefícios a vários anos e/ou décadas. A adição do remineralizador, nos solos favorece o seu rejuvenescimento, pelo acréscimo gradativo de vários nutrientes que foram perdidos por processos naturais e/ou antrópicos (Leonardos et al., 1976; Theodoro, 2000; Carvalho, 2012).

O material de origem influenciou nos resultados mineralógicos para as geologias estudadas. Fernandes et al. (2020) caracterizando o Planalto Ocidental

Paulista (POP), identificaram que a concentração de Fe no material de origem, favoreceu a formação da Gb sobre Ct. A Hm e Gt se relaciona com a natureza do material de origem. Silva et al. (2020), verificaram que a abundância de Hm e Gt no estado de São Paulo, onde, juntas representaram 89% do teor de óxidos de ferro, elevou o Fe_2O_3 dos solos basálticos sendo 54% maior que a dos solos arenosos.

2.3.5 Correlação das variáveis dos solos

Para facilitar a identificação dos agrupamentos das variáveis em função das doses e modo de aplicação do remineralizador foi conduzida a análise multivariada de agrupamento e confeccionado o gráfico *heatmap* para ilustrar em escala de cores em qual tratamento (dose e modo de aplicação) os atributos do solo são mais ou menos expressivos. Nos solos de geologia arenítica o foi de $R^2 = 0,82$. O tratamento que melhor representou as variáveis analisadas foi o $0,8 \text{ t ha}^{-1}$ (ML) (Figura 11). Nos solos basálticos, obteve-se $R^2 = 0,78$ (Figura 12). O tratamento mais representativo foi o $1,6 \text{ t ha}^{-1}$ (ML). O aumento do pH do solo resultou em aumento da CTC, acompanhado por aumentos nos níveis trocáveis de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{2+} fornecidos pelo remineralizador de basalto.

No solo de geologia arenítica, em relação aos manejos, observa-se uma divisão em dois grupos bem representativos, formados por subgrupos: Grupo formado pelos manejos: 1.6 MR e 1.6 ML e 0.8 MR e Grupo formado por 0.4 ML e 0.4 MR e 0.8 ML e controles. Dentre o grupo 1.6 MR destaca-se por apresentar mais concentração/teor no solo para os atributos: Feo e pH, e vários diâmetros de minerais, observa-se cor amarelo mais intenso. Em relação aos atributos, observa-se uma divisão em dois grupos bem representativos: diferentes formas de Fe relações de Ct e Gt, alumínio, xFD, P e pH. Variáveis associadas aos diâmetros estão em outro grupo, junto a indicadores de fertilidade: MO, V% e CTC.

Para os solos de geologia basáltica em relação aos manejos, o comportamento é diferente comparando com os solos de Arenito. Existem mais grupos representativos. O grupo 1.6 MR e 1.6 ML e 0.4 ML, principalmente 1.6ML e 0.4 ML apresentam características similares em relação aos atributos associados aos grupos das diferentes formas de Fe. Os atributos, apresenta comportamento semelhante em

termos de divisão de grupos o solo de Arenito. Dividindo os diferentes ferros dos diâmetros de Hm, Gb e Ct. Os tratamentos 0.4 MR e 0.8 ML também apresentam mesmo comportamento/características em função dos dois grupos de atributos.

O tratamento 0.8 MR se destaca-se por ser caracterizado com maiores diâmetros de Ct, Gt110, Hm012 (intensos) e XFD. Em relação aos atributos, comportamento em termos de divisão de grupos parecido com o Arenito. Dividindo os diferentes ferros dos diâmetros de Hm, Gb e Ct. A técnica de manejo influencia a velocidade e a capacidade de reação dos nutrientes contido no material de origem que irá ser aplicado no solo. Para esta pesquisa, o manejo lanço (ML) apresentou maior interação em 90 dias. A alteração mineralógica do solo com o uso de remineralizador inferiu diretamente na fertilidade solo (Toscani e Campos, 2017).

Conceição et al. (2022) avaliando as propriedades químicas de solos e os efeitos nas culturas de milho e feijão com uso de remineralizador de basalto, constataram que aumentou a acumulação de macro e micronutrientes nas plantas. Estes autores afirmam que os diversos benefícios do pó de basalto devem-se à sua rocha mãe, que fornece parte dos macro e micronutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas e ao reequilíbrio do pH do solo. Silveira e Nobili (2023) estudando o uso de remineralizador de basalto para o cultivo de cana-de-açúcar de sétimo corte a lanço observaram acréscimo lineares significativos, com 28,57% para a produtividade estimada de tonelada de colmo por hectare e de 42,27% de toneladas de Oligossacarídeos por hectare.

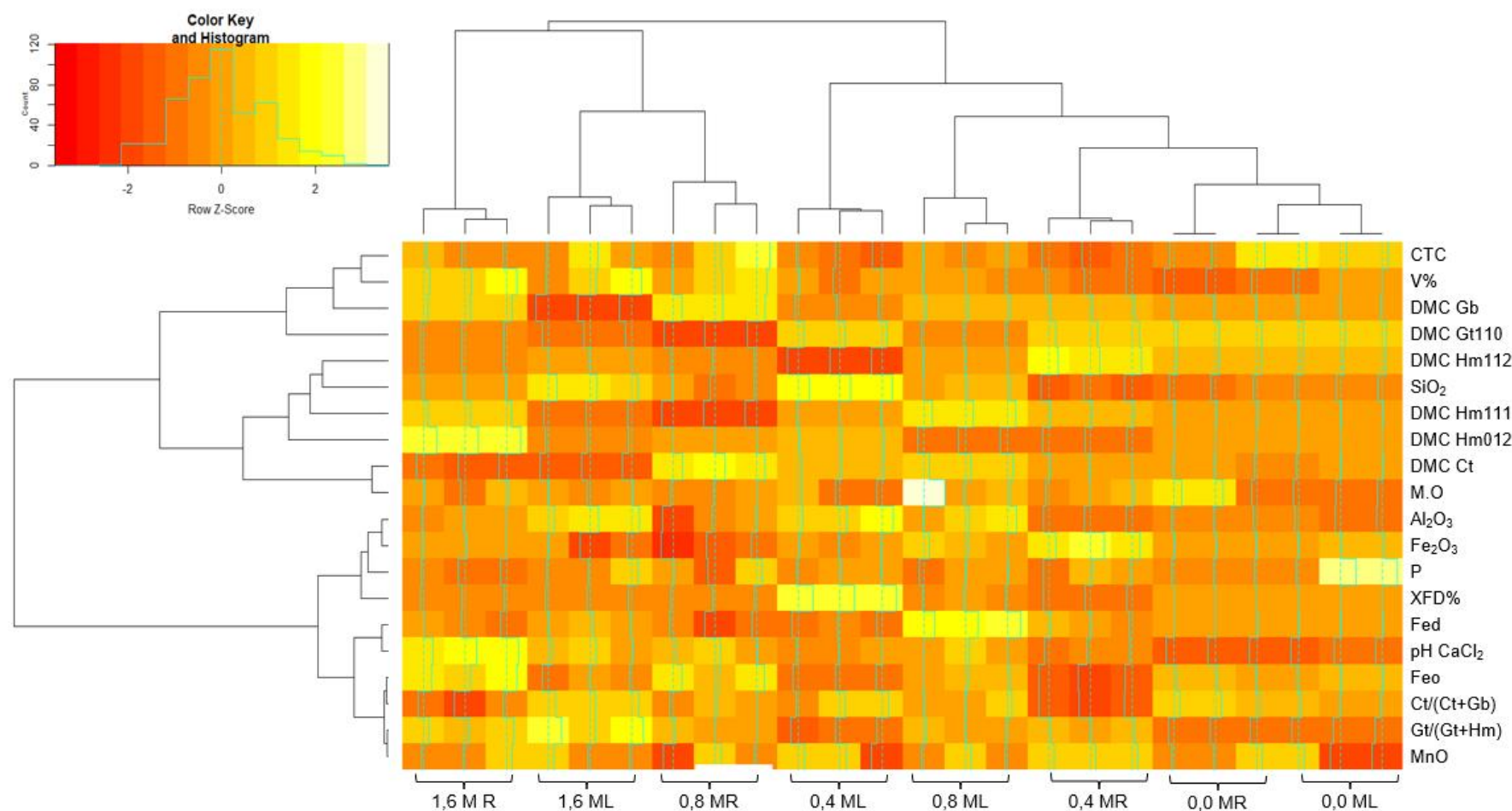


Figura 11: Gráfico de heatmap ($R^2=0,82$; $p < 0,01$) com atributos de solo (ML –manejo lanço) e (MR – manejo revolvido) em função das doses do remineralizador de basalto no solo de geologia arenítica. O dendrograma representa os agrupamentos dos manejos e doses (acima do mapa) e dos atributos (na lateral do mapa) baseado em padrões de similaridades de variação.

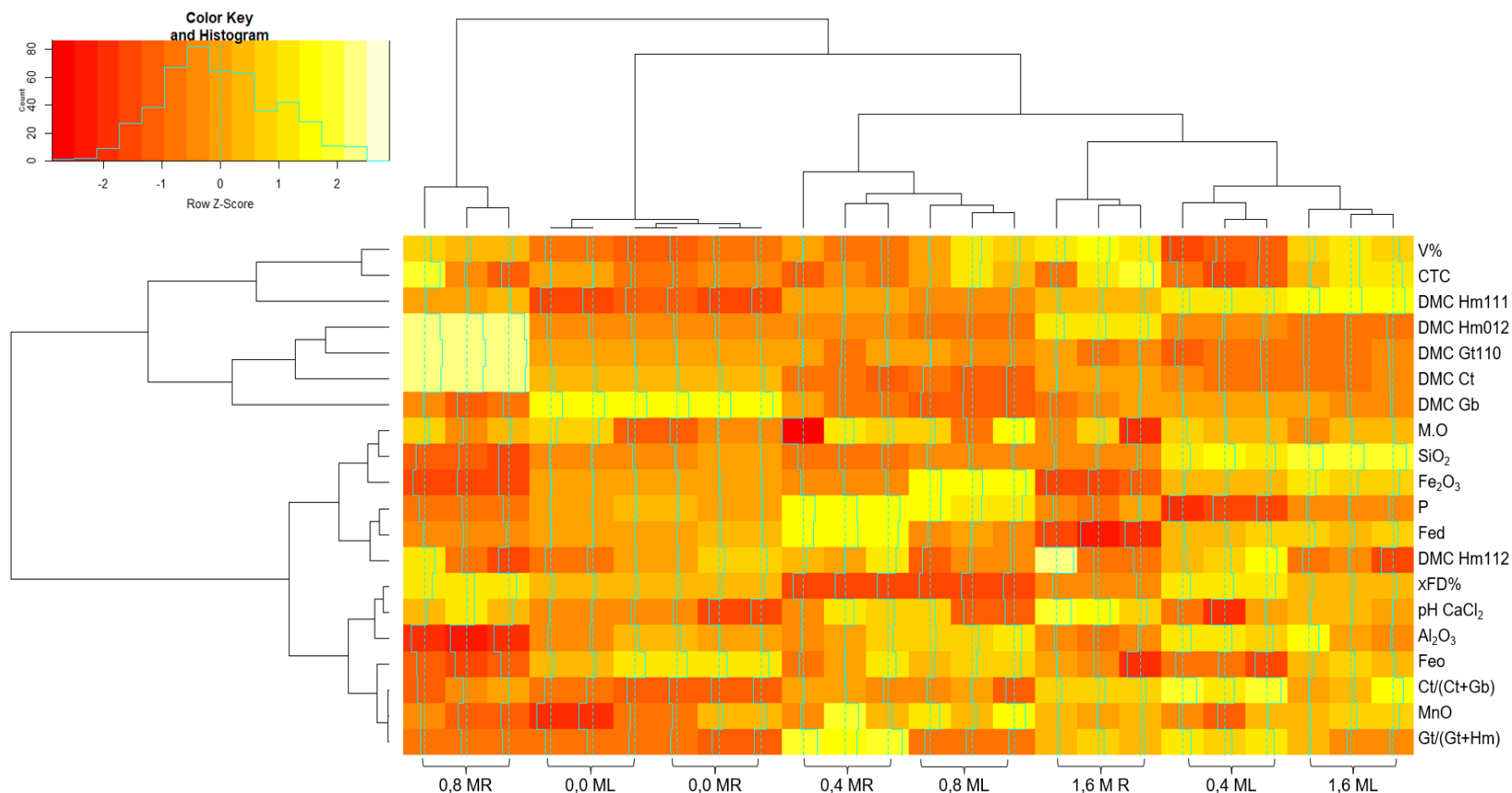


Figura 12: Gráfico de heatmap ($R^2=0,78$; $p < 0,01$) com atributos de solo nos manejos (ML – lanço) e (MR – revolvido) em função das doses do remineralizador de basalto no solo de geologia basáltica. O dendrograma representa os agrupamentos dos manejos e doses (acima do mapa) e dos atributos (na lateral do mapa) baseado em padrões de similaridades de variação.

Conclusões

- I. O uso do remineralizador de basalto altera a dinâmica dos solos de origem arenítica e basáltica em curto espaço de tempo.
- II. O remineralizador de basalto modificou os padrões mineralógicos dos solos, alterando a intensidade da cristalinidade da hematita (Hm), goethita (Gt), caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) nos solos de diferentes geologias.
- III. O remineralizador de basalto aumentou o pH, a capacidade de troca de cargas, e saturação de bases para solos areníticos e basálticos.
- IV. Para as condições de estudo o tratamento que apresentou melhor efeito do remineralizador de basalto como condicionador de solos, elevando o pH, aumentando a disponibilidade de nutrientes nos solos, foi 0,8 t ha⁻¹ (manejo lanço) para geologia arenítica e 1,6 t ha⁻¹ (manejo à lanço) e para geologia basáltica.
- V. São necessários estudos mais longos e detalhados envolvendo espécies vegetais para apontar toda a dinâmica que o uso do remineralizador pode promover nas propriedades químicas, físicas, biológicas e mineralógicas do solo.

Referências

Albert R (1938) Untersuchungen uber die Verwendbarkeit von Gesteinsabfglen verschiedener Herkunft und Art zur Verbesserung geringwertiger WaldWen. **Forstarch**. 14: 237-240.

Alovisi AMT (2021) Uso do pó de rocha basáltica como fertilizante alternativo na cultura da soja. **Research, Society and Development**. 10: e33710615599-e33710615599.

Alovisi AMT, Taques MM, Alovisi AA, Tokura LK, da Silva RS, Piesanti GHLM (2017) Alterações nos atributos químicos do solo com aplicação de pó de basalto. **Acta Iguazu**, 6(5), 69-79.

Assis LBD (2015) Agroecologia sob a visão do direito: estudo do manejo da rochagem como demonstração de que a agroecologia é instrumento de direito à alimentação e de preservação da vida. Dissertação (Mestrado em Direito Agrário) UFG – Goiânia.

Bamberg AL, Martinazzo R, Silveira CAP, Pillon CN, Stumpf L, Bergmann M, Souza ME (2023) Soil Fertilization and Maize-Wheat Grain Production with Alternative Sources of Nutrients. Version 1, **Research Square**. p. 1 – 25.

Beauvais A, Tardy Y (1991) Formation et dégradation des cuirasses ferrugineuses sous climat tropical humide, à la lisière de la forêt équatoriale. **Compte Rendus de l'académie des Sciences**. 2: 1539 - 1545.

Bish DL (1993) Studies of clays and clay minerals using X-ray powder diffraction and the Rietveld method (No. LA-UR-93-2660; CONF-9309232-1). **Los Alamos National Lab.**, NM (United States).

Bono JAM, Assis TE (2023) Remineralizador de Solo na Cultura da Soja em Diferentes Sistemas de Plantio e Modos de Aplicação. **Ensaio e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde**, v. 27, n. 2, p. 243-252.

Brandão JAV (2012) **Pó de rocha como fonte de nutrientes no contexto da agroecologia**. Dissertação (Agroecologia e Desenvolvimento Rural) UFSCar - Araras.

BRASIL (2013) **Lei no. 12.890** - Altera a Lei n. 6.894 para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura. Brasília, DF: Diário Oficial da União - Palácio do Planalto. <https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/112213899/lei-12890-13>.

BRASIL (2016) **Instrução Normativa 5** - Regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. Brasília, DF: Diário Oficial da União - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. <in-5-de-10-3-16-remineralizadores-e-substratos-para-plantas.pdf (www.gov.br)>

Brito RS, Batista JF, Vale Moreira JG, Moraes KNO, da Silva SO (2019) Rochagem na agricultura: importância e vantagens para adubação suplementar. **South American Journal of basic education, technical and technological**. 6: 528-540.

Brown G (1980) Associated minerals. In., Brown G. Crystal structures of clay minerals and their x-ray identification. **Mineralogical Society**. 6: 361-410.

Bundy WM, Johns WD, Murray HH (1966) Inter-relações de propriedades físicas e químicas de caulinitas. In.: **Argilas e Argilominerais** p. 331 – 346.

Burbano DFM, Theodoro SH, Carvalho AMX, Ramos CG (2022) Crushed volcanic rock as soil remineralizer: a strategy to overcome the global fertilizer crisis. **Natural Resources Research** 31: 2197-2210.

Camargo AO, Moniz AC, Jorgr JA, Valadares LMAS (1986) **Métodos de análise química, mineralógica e física dos solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 96 p. (Boletim Técnico 106).

Camargo MSD, Korndörfer GH, Pereira HS (2007) Solubilidade do silício em solos: influência do calcário e ácido silícico aplicados. **Bragantia**, 66: 637 - 647.

Carvalho AMXD (2012) **Rochagem e suas interações no ambiente solo: contribuições para aplicação em agroecossistemas sob manejo agroecológico**. Tese (Doutorado em solos e Nutrição de Plantas) UFV – Viçosa.

Coey JMD (1988) Magnetic Properties of iron in soil oxides and clay minerals. In.: Stuck JW, Goodman BA, Schwertmann, U eds. **Iron in soils and clay minerals**. Dordrecht D Reidel. p. 65 – 84.

Cola GPA, Simão JBP (2012) Rochagem como forma alternativa de suplementação de potássio na agricultura agroecológica. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**. 7: 3.

Conceição LT, Silva GN, Holsback HMS, Figueiredo OC, Marcante NC, Souza Martins É, Santos EF (2022) Potential of basalt dust to improve soil fertility and crop nutrition. **Journal of Agriculture and Food Research**. 10: 100443.

Costa ACS, Bigham JM (2015) Óxidos de Ferro. In.: Ker JC, Curi N Schaefer CEGR, Vidal-Torrado P (Eds.) **Pedologia Fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 505 – 572.

Cunha P, Marques Júnior J, Curi N, Pereira GT, Lepsch IF (2005) Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma seqüência arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 29: 81-90.

Curi N, Franzmeier DP (1987) Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some Oxisols in Brazil. **Soil Science Society of America Journal** 51: 153 - 158.

Dearing JA (1994) **Environmental magnetic susceptibility**. Using the Bartington MS2 System. British Library. England, p. 104.

Deer WA, Howie RA, Zussman J (2013) **An Introduction to the Rock-forming Minerals**. 3rd ed. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland.

Dick DP (1986) **Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes B Latossólicos**. Dissertação (Mestrado em Solos) – UFRGS, Porto Alegre.

Dixon JB, Weed SB (1989) Minerals in Soil Environments: Kaolin and Serpentine Group Minerals. Published by: **Soil Science Society of America**. Madison, Wisconsin, USA.

FAO (2022) **The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture** – Systems at breaking point. Main report. Rome.

Fernandes K, Júnior JM, Souza BASR, Dematte JA, Ribon AA (2020) Landscape-scale spatial variability of kaolinite-gibbsite ratio in tropical soils detected by diffuse reflectance spectroscopy. **Catena** 195: 104795.

Fernández RIE, Novais RF, Nunes FN, Ker JC (2008) Reversibilidade de fósforo não-lábil em solos submetidos à redução microbiana e química: II-extrações sucessivas do fósforo pela resina de troca aniônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 32: 2319-2330.

Flanagan FJ (1969) US Geological Survey standards—II. First compilation of data for the new USGS rocks. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 33: 81-120.

Gillman GP, Burkett DC, Coventry RJ (2001) A laboratory study of application of basalt dust to highly weathered soils: effect on soil cation chemistry. **Soil Research**, 39: 799-811.

Hair JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE, Tatham RL (2009) **Análise multivariada de dados**. Bookman editora. 6 ed.

Hanisch AL, da Fonseca JA, Junior AAB, Spagnollo E (2013) Efeito de pó de basalto no solo e em culturas anuais durante quatro safras, em sistema de plantio direto1. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável** 3: 100 – 107.

Han-Jing F, Xing J, Hang-Hai L (2021) 硅酸盐化学风化强度评估的沉积物指标与方法研究进展□. **古地理学报**. 23: 6.

Hilf HH (1938) The manuring of poor soils with basalt grit. **Forstarchiv**. 14: 93-100.

Jackson ML (1985) **Soil Chemical Analysis**. 2 nd edition. Madison. p. 930.

Jing K, Min X, Song W, Xu D, Li X (2024) Effect of filling materials on reconstructed soil phosphorus adsorption and desorption in mining area. **Soil and Tillage Research**, 235, 105895.

Jochum KP, Weis U, Schwager B, Stoll B, Wilson SA, Haug GH,ENZWEILER J (2016) Reference values following ISO guidelines for frequently requested rock reference materials. **Geostandards and Geoanalytical Research**. 40: 333-350.

Jones LHP, Handreck KA (1963) Effects of iron and aluminum oxides on sílica in solution in soils. **Nature**, 198: 852-853.

Jones RC, Malik HU (1994) Analysis of minerals in oxide-rich soils by x-ray diffraction. In.: Amonette JE, Zalazny LW. **Quantitative Methods in soil mineralogy**. Soil Science Society of américa, p. 296-326.

Kaiser, H (1958) The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**. 23.3:187-200.

Kämpf N, Curi N (2000) Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pirogênicos e geoquímico. In.: Novais RF, Alvarez VVH, Schaefer CEGR. **Tópicos em ciência do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1: 107-38.

Kämpf N, Marques JJ, Curi N (2015) Mineralogia de Solos Brasileiros. In.: Ker JC, Curi N Schaefer CEGR, Vidal-Torrado P (Eds.) **Pedologia: Fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 81-146.

Kämpf N, Schwertmann U (1982) Goethite and hematite in a climosequência in Southern Brazil and their application. In.: classification of kaolinitic Soils. **Geoderma**, Amsterdam. 29: 27-39.

Kämpf N, Schwertmann U (1998) Avaliação da estimativa de substituição de Fe por Al em hematitas de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 22, n. 2, p. 209-213.

Kämpf N. (1988) O ferro no solo. In.: Reunião sobre ferro em solos inundados, 1., Goiânia, **Anais**. Goiânia, Embrapa/CNPAP.

Kelland ME, Wade PW, Lewis AL, Taylor LL, Sarkar B, Andrews MG, Beerling, DJ (2020) Increased yield and CO₂ sequestration potential with the C₄ cereal Sorghum bicolor cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil. **Global Change Biology**. 26: 3658-3676.

Klug HP, Alexander LE (1974) X-ray diffraction procedures: for polycrystalline and amorphous materials. 992 p.

Kovács S, Kutasy E, Csajbók J (2022) The multiple role of silicon nutrition in alleviating environmental stresses in sustainable crop production. **Plants**. 11: 1223.

Krahl, L, Simone PADP, Rômulo, SA, Leonardo FV, José CSS, Giuliano M, Éder D SM (2020) Successive off take of elements by maize grown in pure basalt powder. **African Journal of Agricultural Research**, 15 (2) 229-239.

Lacerda MPC, Andrade H, Quéméneur JJG (2001) Transformações mineralógicas ao longo de perfis de alteração pedogenética na região de Lavras (MG). **Revista brasileira de ciência do solo**. 25: 799-809.

Lajús CR, Busnello FJ, Sauer AV, Costella MF, Dalcanton F (2023) Tecnologia e Gestão da Inovação em Sistemas de Produção Sustentáveis. Campina Grande: EPTEC.

Lefebvre D, Goglio P, Williams A, Manning DA, de Azevedo, AC, Bergmann M, Smith P (2019) Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through Life Cycle Assessment: A case study for Sao Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production** 233: 468 - 481.

Leonardos OH, Fyfe WS, Kronberg BI (1976) Rochagem: O método de aumento da fertilidade em solos lixiviados e arenosos. **Anais**, 29: 137-145.

Leonardos OH, Theodoro SH, Assad ML (2000) Remineralization for sustainable agriculture: A tropical perspective from a Brazilian viewpoint. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** 56: 3-9.

Lepchak JK (2020) **Dissolução e precipitação de minerais em um Latossolo após 5 anos de aplicação de pó de diabásio**. Dissertação (Mestre em Solos e Nutrição de Plantas) USP - Piracicaba.

Lisztes-Szabó Z, Filep A F, Csík A, Pető Á, Kertész TG, Braun M (2020) pH-dependent silicon release from phytoliths of Norway spruce (*Picea abies*). **Journal of Paleolimnology** 63: 65-81.

Machado MA, Rhoden AC (2022) Aplicação da agricultura regenerativa no brasil: estudo de caso no oeste catarinense. **Anais**, de Agronomia, 2 (1), 14-36.

Mafrá AL, Silva EF, Cooper M, Demattê JLI (2001) Pedogênese de uma seqüência de solos desenvolvidos de arenito na região de Piracicaba (SP). **Revista brasileira de ciência do solo** 25: 355 - 369.

Manning DAC, Theodoro SH (2020) Enabling food security through use of local rocks and minerals. **The Extractive Industries and Society** 7: 480 – 487.

Medeiros DS, Sanchotene DM, Ramos CG, Oliveira LFS, Sampaio CH, Kautzmann RM (2021) Soybean crops cultivated with dacite rock by-product: A proof of a cleaner technology to soil remineralization. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. 9: 106742.

Mehra OP, Jackson ML (1960) Iron oxide removed from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**. 7:1317-327.

Mello JWV, Perez DV (2009) Equilíbrio químico das reações no solo. In.: ALLEONI, L. R. F. e MELO, V. de F. (Ed.). **Química e Mineralogia do Solo: Parte I - Conceitos básicos**. Viçosa: SBCS.

Melo VF, UChôa SCP, Dias FDO, Barbosa GF (2012) Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. **Acta amazônica**, 42, 471-476.

Melo VF, Wypych F (2015) Caulinita e Halóisita. In.: Melo VF e Alleoni LRF 2ed **Química e Mineralogia do Solo: Conceitos Básicos e Aplicações**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 427-504.

Moore DM, Reynolds RC (1989) **X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals** Oxford: Oxford University Press, p 332.

Moraes LN (2021) Uso de pó de rocha na agricultura brasileira. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 40 p.

Multivariada de dados. 5ª Ed. Porto Alegre, RS, 2005. 688 p.

Murray HH, Lyons SC (1960) Further correlations of kaolinite crystallinity with chemical and physical properties. In.: **Clays and Clay Minerals** p. 11-17 Pergamon.

Nichele ER (2006) **Utilização de minerais no desenvolvimento de plantas e na mitigação de odores em criação de animais confinados**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) UDESC – Lages.

Norrish K, Taylor RM (1961) The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. **Journal of soil science**, Oxford, v. 12, n. 2, p. 294-306.

Novais RF, Mello JWV (2007) Fertilidade do solo: IV Relação solo planta. Sociedade brasileira de ciência do solo. Viçosa, MG.

Padarian J, Minasny B, McBratney AB (2015) Usando a plataforma baseada em nuvem do Google para mapeamento digital de solos. **Computadores e geociências**. 83: 80-88.

Pádua EJ (2012). Rochagem como adubação complementar para culturas oleaginosas. Dissertação (PósGraduação em Ciência do Solo) UFLA, Lavras.

Prado H, Prado TAB (2022) Pedologia fácil: Aplicação em solos tropicais. 6ed, Piracicaba SP.

R Development Core Team, 2022. R: a Language and Environment for Statistical Computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna.

Raij, BV, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (2001) **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas, Instituto Agrônomo, p. 285.

Ramos CG, Hower JC, Blanco E, Oliveira MLS, Theodoro SH (2022) Possibilities of using silicate rock powder: An overview. **Geoscience Frontiers** 13: 101185.

Ramos CG, Querol X, Oliveira ML, Pires K, Kautzmann RM, Oliveira LF (2015) A preliminary evaluation of volcanic rock powder for application in agriculture as soil a remineralizer. **Science of the Total Environment**. 512: 371-380.

Resende M (1976) **Minerology, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil**. Purdue University.

Resende M, Curi N, Ker JC, Resende SB (2011) **Mineralogia de Solos Brasileiros: Interpretações e aplicações**. 2 ed. Lavras – UFLA, 206 p.

Ribeiro LS et al. (2010) Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 1: 891–897.

Salomão PEA, Kriebel W, dos Santos AA, Martins ACE (2020) A importância do sistema de plantio direto na palha para reestruturação do solo e restauração da matéria orgânica. **Research, Society and Development**, 9(1), e154911870-e154911870.

Santos HG, Zaroni MJ (2021) Solos tropicais: Teor de Óxidos de Ferro. **Embrapa**.

Scapin MA (2003) **Aplicação da difração e fluorescência de raios X (WDXRF): ensaios em argilominerais**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – INPE, Universidade de São Paulo.

Schaefer CEG, Fabris JD, Ker JC (2008) Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**. 43: 137-154.

Silva LS, Júnior JM, Barrón V, Gomes RP, Teixeira DDB, Siqueira DS, Vasconcelos V (2020) Spatial variability of iron oxides in soils from Brazilian sandstone and basalt. **Catena** 185: 104258.

Silva MAS, Santos AB, Machado PLOA, Alcantara FA, Fageria NK, Silva OF (2021) Sistema de Cultivo: Correção da acidez do solo. EMBRAPA. Disponível ><https://www.embrapa.br/en/agenciadeinformacaotecnologica/cultivos/arroz/producao/sistema-de-cultivo/arroz-irrigado-na-regiao-tropical/correcao-do-solo-e-adubacao/correcao-da-acidez-do-solo><. Acesso em 23 mar. 2023.

Silva RCD, Ferreira EP, Azevedo ACD (2021) Weathering features of a remineralizer in soil under different land uses. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**. 56: e01442.

Silveira CM, Nobili FO (2023) Rochagem: uso de pó de rocha em cana-de-açúcar. Elevagro. Disponível > <https://elevagro.com/conteudos/materiais-tecnicos/rochagem-uso-de-po-de-rocha-em-cana-de-acucar> <. Acesso em 29 out 2023.

Sneath PHA, Sokal RR (1973) Numerical taxonomy. San Francisco: Freeman and Co., 1973. 573 p.

Soares MR (2020) **Separação e caracterização da fração nanométrica dos minerais dos solos e sua importância na sorção de nutrientes e qualidade estrutural dos solos**. Tese (Doutorado em Química Analítica) USP – São Carlos.

Souza MEPD (2014) Vermicompostagem enriquecida com pós de rochas e sua utilização em sistemas agroecológicos. Tese (Solos e de Plantas) - UFV, Viçosa.

Souza MPRD, Bidarra ZS (2022) Política pública de apoio à agricultura digital. **Revista de Política Agrícola**. 31: 18.

Steinhoefel G, Breuer J, Von Blanckenburg F, Horn I, Sommer M (2017) The dynamics of Si cycling during weathering in two small catchments in the Black Forest (Germany) traced by Si isotopes. **Chemical Geology** 466: 389 - 402.

Swoboda P, Döring TF, Hamer M (2022) Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. **Science of The Total Environment**. 807: 150976.

Tardy Y, Nahon D (1985) Geochemistry of laterites, stability of Al-goethite, Al-hematite, and Fe (super 3+)-kaolinite in bauxites and ferricretes; an approach to the mechanism of concretion formation. **American Journal of Science**. 285: 865-903.

Tavares LDF, de Carvalho AMX, Camargo LGB, Pereira SGDF, Cardoso IM (2018) Nutrients release from powder phonolite mediated by bioweathering actions. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 7: 89-98.

Theodoro SMCH (2000) **A Fertilização da Terra pela Terra: uma alternativa para a sustentabilidade do pequeno produtor rural**. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) - UnB, Brasília.

Theodoro SMDCH, Leonardos OH, Rocha EL, Rego KG (2006) Experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes. **Espaço & Geografia**. 9: 263 – 292.

Theodoro SMDCH, Tchouankoue JP, Gonçalves AO, Leonardos OH, Harper J (2012) A importância de uma rede tecnológica de rochagem para a sustentabilidade em países tropicais. **Revista Brasileira de Geografia Física**. 1390-1407

Toscani RGS, Campos JEG (2017) Uso de pó de basalto e rocha fosfatada como remineralizadores em solos intensamente intemperizados. **Geociências**, v. 36, n. 2, p. 259 – 274.

Van Raij, B. (2011). Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. **International Plant Nutrition Institute**.

Vendrame PPS, Eberhardt DN, Rodrigues O (2011) Formas de ferro e alumínio e suas relações com textura, mineralogia e carbono orgânico em Latossolos do Cerrado. **Ciências Agrárias**, Londrina, V2 32.

Webers ER, Redin M, Canepelle E, Gutkoski LC, de Souza EL, Weber FH (2023) Pó de basalto associado com *Azospirillum brasilense* na qualidade industrial do trigo. **Observatório de la economía latinoamericana**, 21(7), 5908-5927.

Weerasuriya TJ, Pushpakumara S, Cooray PI (1993) Acidulated pegmatitic mica: a promising new multi-nutrient mineral fertilizer. **Fertilizer research** 34: 67 - 77.

White AF, Brantley SL (2003) The effect of time on the weathering of silicate minerals: why do weathering rates differ in the laboratory and field? **Chemical Geology** 202: 479-506.

Yang S, Bai Y, Alatalo JM, Wang H, Jiang B, Liu G, Chen J (2021) Spatio-temporal changes in water-related ecosystem services provision and trade-offs with food production. **Journal of Cleaner Production**. 286: 125316.

Zhao S, Yan Y, Han J (2021) Industrial land change in Chinese Silk Road cities and its influence on environments. **Land**, v. 10, n. 8, p. 806.

Considerações Finais

O remineralizador de basalto, interagiu significativamente nas geologias dos solos areníticos e basáltico em curto espaço de tempo. Inferiu o seu potencial em modificações nos parâmetros químicos, mineralógicos e geoquímico dos solos. Com ação de condicionador e alteração dos minerais Ct, Gb, Hm e Gt do solo. Ainda não existe um consenso sobre quantidades ideais de aplicação de remineralizadores de solos, variam de $< 1 \text{ t ha}^{-1}$ até $> 100 \text{ t ha}^{-1}$ (Swoboda et al., 2022).

Considerando que o uso de remineralizador libera gradativamente nutrientes quando associados a cultura. Estudos relataram economia nos custos de produção de até 50% com o uso de remineralizador basáltico (Mello et al., 2012; Conceição et al., 2022; Silveira e Nobili 2023). Porém, o uso do remineralizadores nos solos, ainda enfrenta alguns desafios.

A disponibilidade em larga escala e pesquisas voltadas no âmbito de definir doses e forma de manejo. Para atender a demanda dos solos tropicais é necessário realizar um estudo prévio de compatibilidade entre o remineralizador utilizado com a geologia do solo que irá receber este material. Assim, garanti a eficiência da dissolução dos nutrientes do remineralizador ao longo do tempo na solução do solo.

A aplicação de reineralizadores reduz a dependência de fertilizantes químicos, promovendo uma agricultura mais sustentável e ecologicamente correta. Além de melhora a estrutura do solo, proporcionando uma maior capacidade de retenção de água e aeração. Por sua composição mineral, o remineralizador é eficaz na neutralização da acidez do solo, melhorando o pH.

Todavia, apresenta-se como uma alternativa promissora para a agricultura sustentável, garantindo a segurança alimentar, mitigação das mudanças climáticas e sequestro de carbono. O uso desta tecnologia pode contribuir para práticas agrícolas mais ecologicamente responsáveis e produtivas, alcançando os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), tais como fome zero (ODS2), consumo e produção sustentáveis (ODS12), clima mitigação de mudanças (ODS 13) e reversão da degradação da terra (ODS 15).

Apêndice

TABELA 1: Análise de variância da largura à meia altura (LMA) da fração argila do solo de geologia arenítica para os manejos em função das doses dos atributos cristalográficos.

Geologia Arenítica										
LMA Gt 110 (°2θ)						LMA Hm 012 (°2θ)				
Manejo	0.0 t ha ⁻¹	0.4 t ha ⁻¹	0.8 t ha ⁻¹	1.6 t ha ⁻¹	Média	0.0 t ha ⁻¹	0.4 t ha ⁻¹	0.8 t ha ⁻¹	1.6 t ha ⁻¹	Média
ML	0.19 Aab	0.17 Ab	0.21 Aa	0.20 Aab	0,19	0.32 Aa	0.30 Aa	0.20 Bb	0.17 Ac	0,25
MR	0.19 Ab	0.18 Abc	0.23 Aa	0.14 Bbc	0,19	0.32 Aa	0.28 Bb	0.28 Ab	0.16 Ac	0,26
Méd.	0,19	0,13	0,22	0,17		0,32	0,29	0,24	0,16	
Análise da variância (F)					Análise da variância (F)					
Dose	10.27 ***				182.15 ***					
Manejo	0.94 ns				4.56 *					
D*M	7.05 **				21.58 ***					
CV%	8,94				4,93					
LMA Gt 111 (°2θ)						LMA Ct (°2θ)				
Manejo	0.0 t ha ⁻¹	0.4 t ha ⁻¹	0.8 t ha ⁻¹	1.6 t ha ⁻¹	Média	0.0 t ha ⁻¹	0.4 t ha ⁻¹	0.8 t ha ⁻¹	1.6 t ha ⁻¹	Média
ML	0.19 Ac	0.20 Abc	0.24 Aa	0.22 Aab	0,21	0.32 Aa	0.32 Aa	0.30 Ab	0.32 Aab	0,32
MR	0.19 Ab	0.12 Bc	0.26 Aa	0.18 Bb	0,19	0.32 Aa	0.28 Bb	0.28 Ab	0.32 Aa	0,3
Méd.	0,19	0,16	0,25	0,20		0,32	0,30	0,29	0,32	
Análise da variância (F)					Análise da variância (F)					
Dose	64.78 ***				12.00 ***					
Manejo	30.03 ***				10.80 **					
D*M	20.15 ***				3.95 *					
CV%	5,76				3,63					
LMA Hm 110 (°2θ)						LMA Gb (°2θ)				
Manejo	0.0 t ha ⁻¹	0.4 t ha ⁻¹	0.8 t ha ⁻¹	1.6 t ha ⁻¹	Média	0.0 t ha ⁻¹	0.4 t ha ⁻¹	0.8 t ha ⁻¹	1.6 t ha ⁻¹	Média
ML	0.21 Aab	0.24 Aa	0.13 Bc	0.18 Ab	0,19	0.15 Ab	0.16 Ab	0.12 Ab	0.24 Aa	0,17
MR	0.21 Aab	0.12 Bc	0.22 Aa	0.18 Ab	0,18	0.15 Aa	0.15 Aa	0.12 Aa	0.13 Ba	0,14
Méd.	0,21	0,18	0,17	0,18		0,15	0,16	0,12	0,18	
Análise da variância (F)					Análise da variância (F)					
Dose	5.06 *				10.54 ***					
Manejo	1.86 ns				14.88 **					
D*M	43.62 ***				10.69 ***					
CV%	8,92				12,8					

** significativo a 1%. Média seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. LMA - largura à Meia Altura, grau 2 theta (°2θ).

TABELA 2: Análise de variância da largura à meia altura (LMA) da fração argila do solo de geologia basáltica para os manejos em função das doses dos atributos cristalográficos.

Geologia Basáltica										
LMA Gt 110 °2θ						LMA Hm 012 °2θ				
Manejo	0.0 t ha ⁻¹	0.4 t ha ⁻¹	0.8 t ha ⁻¹	1.6 t ha ⁻¹	Média	0.0 t ha ⁻¹	0.4 t ha ⁻¹	0.8 t ha ⁻¹	1.6 t ha ⁻¹	Média
ML	0.14 Ac	0.22 Ab	0.31 Aa	0.22 Ab	0,22	0.20 Ab	0.23 Ab	0.33 Aa	0.21Ab	0,24
MR	0.14 Ab	0.24 Aa	0.25 Ba	0.15 Bb	0,15	0.20 Aa	0.18 Ba	0.12 Bb	0.12 Bb	0,16
Méd.	0,14	0,23	0,18	0,19		0,20	0,20	0,23	0,16	
Análise da variância (F)						Análise da variância (F)				
Dose	101.19 ***					8.72 **				
Manejo	16.82 ***					90.61 ***				
D*M	13.46 ***					23.86 ***				
CV%	6,89					11,41				
LMA Gt 111 °2θ						LMA Ct °2θ				
Manejo	0.0 t ha ⁻¹	0.4 t ha ⁻¹	0.8 t ha ⁻¹	1.6 t ha ⁻¹	Média	0.0 t ha ⁻¹	0.4 t ha ⁻¹	0.8 t ha ⁻¹	1.6 t ha ⁻¹	Média
ML	0.13 Ac	0.24 Ab	0.33 Aa	0.24 Ab	0,24	0,49	0,46	0,52	0,53	0.50 A
MR	0.13 Ab	0.26 Aa	0.24 Ba	0.18 Bb	0,20	0,49	0,48	0,51	0,49	0.49 A
Méd.	0,13	0,25	0,29	0,21		0.49 a	0.47 a	0.51 a	0.51 a	
Análise da variância (F)						Análise da variância (F)				
Dose	46.31 ***					2.47 ns				
Manejo	11.70 **					0.24 ns				
D*M	7.26 **					0.95 ns				
CV%	10,64					6,63				
LMA Hm 110 °2θ						LMA Gb °2θ				
Manejo	0.0 t ha ⁻¹	0.4 t ha ⁻¹	0.8 t ha ⁻¹	1.6 t ha ⁻¹	Média	0.0 t ha ⁻¹	0.4 t ha ⁻¹	0.8 t ha ⁻¹	1.6 t ha ⁻¹	Média
ML	0.18 Ab	0.24 Aa	0.18 Ab	0.23 Aa	0,21	0.16 Aa	0.17 Aa	0.17 Aa	0.18 Aa	0,17
MR	0.18 Aa	0.17 Ba	0.16 Aa	0.18 Ba	0,15	0.16 Aa	0.14 Aab	0.10 Bb	0.11 Aab	0,13
Méd.	0,18	0,21	0,13	0,20		0,16	0,16	0,13	0,15	
Análise da variância (F)						Análise da variância (F)				
Dose	30.11 ***					2.06 ns				
Manejo	69.01 ***					21.29 ***				
D*M	12.46 ***					3.74 *				
CV%	9.33					15.51				

** significativo a 1%. Média seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. LMA - largura à Meia Altura, grau 2 theta (°2θ).