

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DO PÓ DE ROCHA
BASÁLTICA COMO REMINERALIZADOR DE SOLOS

Gabriel Vinicius Lima de Souza

Orientador: Prof. Dr. Jairo Osvaldo Cazetta
Coorientador: Prof. Dr. César Martoreli da Silveira

JABOTICABAL - SP
1º SEMESTRE DE 2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DO PÓ DE ROCHA BASÁLTICA
COMO REMINERALIZADOR DE SOLOS

Gabriel Vinicius Lima de Souza

Orientador: Prof. Dr. Jairo Osvaldo Cazetta

Coorientador: Prof. Dr. César Martoreli da Silveira

Trabalho apresentado à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, para graduação em ENGENHARIA AGRONÔMICA.

JABOTICABAL - SP

1º SEMESTRE DE 2022

S729a

Souza, Gabriel Vinicius Lima de

Avaliação da eficiência agronômica do pó de rocha basáltica como
remineralizador de solos / Gabriel Vinicius Lima de Souza. --
Jaboticabal, 2022

45 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia
Agronômica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Jairo Osvaldo Cazetta

Coorientador: César Martoreli da Silveira

1. Milho. 2. Rocha basáltica. 3. Agricultura sustentável. 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.

DEPARTAMENTO: Biotecnologia Agropecuária e ambiental

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO
TRABALHO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**TÍTULO:** Avaliação da eficiência agrônômica do pó de rocha basáltica como remineralizador de solo**ACADÊMICO:** Gabriel Vinicius Lima de Souza**CURSO:** Engenharia Agrônômica**ORIENTADOR (ES):** Prof. Dr. Jairo Osvaldo Cazetta e Prof. Dr. César Martoreli da Silveira

Aprovado e corrigido de acordo com as sugestões da Banca Examinadora

BANCA EXAMINADORA:

(Nomes)

Presidente	Jairo Osvaldo Cazetta
Membro	César Martoreli da Silveira
Membro	Fábio Luiz Checchio Mingotte

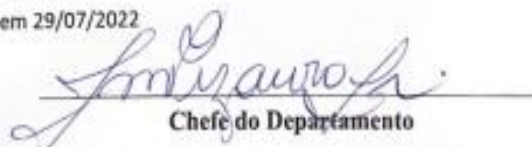
(Assinaturas)



Jaboticabal 25, 07, 2022

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: / /

Ad Referendum em 29/07/2022


Chefe do Departamento

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os professores, alunos e amigos que contribuíram na minha formação acadêmica, pois é graças a todo conhecimento compartilhado que isso se tornou possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida e por todas as oportunidades que me permitiram chegar até aqui.

Aos meus pais, Rosali de Oliveira e Josué Custódio, que sempre me incentivaram e me mostraram que a busca por uma vida melhor só é possível através do conhecimento. A vocês, meu amor e eterna gratidão.

A Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho – FCAV, por todo suporte oferecido e pelo curso que me proporcionou durante esses 5 anos. Levarei esse conhecimento ao longo de minha carreira e só tenho a agradecer.

Um agradecimento especial a empresa Baú Mineração S/A, empresa que forneceu o Pó de Rocha Basáltica, informações do produto e o investimento para desenvolver este trabalho. Com isso, o presente trabalho foi possível de ser desenvolvido e deixo aqui meu muito obrigado.

Ao Colégio Técnico Agrícola (CTA-Unesp), por todo o suporte de alunos, professores e funcionários durante a execução deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jairo Osvaldo Cazetta e o meu coorientador, Prof. Dr. César Martoreli da Silveira, pelas oportunidades oferecidas, conhecimentos compartilhados, orientação e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao corpo docente do curso de Engenharia Agrônômica, a quem devo minha formação. Agradeço também a todos os funcionários da instituição de ensino, em especial ao Técnico de Laboratório José Carlos e ao Técnico Agrícola Nilton César Mafei, por todo o conhecimento compartilhado e pelas instruções.

A todos os meus amigos, pelos bons momentos de faculdade e de companheirismo.

À minha namorada Laila Feliciano da Silva, pessoa que contribuiu de forma indireta neste trabalho, mas sempre me apoiou, motivou e me fez sempre manter a calma e a cabeça no lugar. Todo meu amor a você.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de iniciação científica (PIBIC) durante a execução do projeto de pesquisa.

Ao Programa de Educação Tutorial em agronomia (PET Agro), grupo que me proporcionou muito aprendizado durante quase 3 anos, muito trabalho em grupo, networking, momentos de confraternizações, viagens técnicas etc. Muito grato ao grupo PET Agronomia da Unesp de Jaboticabal – SP.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1 Rochagem e Remineralizadores de solos	11
2.2 Uso de Agrominerais Silicáticos	14
2.3 Cultura do Milho	16
3. OBJETIVOS	17
4. MATERIAL E MÉTODOS	17
4.1 Caracterização das Amostras de Pó de Rocha Basáltica	17
4.2 Localização dos Experimentos	18
4.3 Desenvolvimento Experimental	18
4.3.1 Etapas de Desenvolvimento do Experimento	18
4.3.2 Primeira Etapa: Unidades experimentais, tipos de solo e análises químicas	19
4.3.3 Segunda etapa: Experimentos com culturas em vasos	21
4.3.3.1 Características Agronômicas Analisadas	22
4.3.4 Delineamento experimental e análises estatísticas	22
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
6.1 Caracterização do pó de rocha de basalto	23
6.2 Experimentos com solos e incubação do pó de rocha de basalto	25
6.3 Avaliação agronômica para a cultura do milho	36
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
8. CONCLUSÃO.....	40
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

AValiação DA Eficiência Agronômica DO Pó DE Rocha Basáltica COMO Remineralizador DE Solos

RESUMO

A rochagem é uma técnica de manejo do solo que utiliza produto de fonte natural, o pó de rocha, que em condições adequadas em termos geoquímico, mineralógico e granulométrico é dado como remineralizador de solos. Assim, o objetivo desse estudo foi avaliar a eficiência agronômica do Pó de Rocha Basáltica (PRB) como remineralizador (RM) de solo e fonte de nutrientes para cultura do milho em dois solos com texturas distintas. Após a identificação e caracterização do PRB por meio de análises químicas, mineralógicas, física e físico-químicas, os experimentos com doses do PRB, deram início. Na primeira etapa, foram incubadas as doses em dois solos: Neossolo Quartzarênico – RQ e Argissolo Amarelo distrófico - PAd, contidos em sacos plásticos de polietileno de 10 kg. As doses de PRB foram de 0,0, 7,5, 15,0, 30,0 e, 60,0 t ha⁻¹ para o RQ e de 0,0, 10,0, 20,0, 40,0 e, 80,0 t ha⁻¹ para o PAd, com quatro repetições para cada solo, totalizando 40 unidades experimentais, e os vasos dispostos em delineamento inteiramente casualizado, em casa de vegetação. Após 60 dias de incubação, foram avaliados os atributos químicos dos solos: pH, M.O., P, S, Ca, Mg, K, Al, H+Al, SB, CTC, V%, m%, além dos teores disponíveis de Si, B, Cu, Fe, Mn e Zn. Na segunda etapa, foram instalados, a partir das unidades experimentais da etapa I, dois experimentos com a cultura do milho. Os tratamentos foram dados pelas doses de PRB dadas na etapa I, com quatro repetições, totalizando 20 unidades experimentais para cada solo. Para avaliação da eficiência agronômica, as características analisadas foram altura de plantas (AP), diâmetro de colmos (DC), índice de área foliar estimado (IAFE), teor de clorofila (TC) e, massa de matéria seca da parte aérea (MS). Os dados obtidos nas duas etapas foram submetidos à análise de variância pelo teste de F, ao nível de 5% de probabilidade, seguidos de análise de regressão polinomial para o efeito das doses. Para as características agronômicas, também, foi aplicado o teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Na primeira etapa, a aplicação de doses do PRB incrementou os atributos pH, SB, CTC, V(%) e diminuiu os teores de Al e H+Al e m% em ambos os solos. Quanto aos macronutrientes P, S, Ca, Mg e K, observou-se para os mesmos aumentos de forma linear em seus teores, exceto para o K no solo RQ que apresentou uma distribuição quadrática. Em relação aos teores de M.O., não houve incrementos significativos em ambos os solos, entre os tratamentos propostos. Para os micronutrientes, aumentos lineares ocorreram para os dois solos quanto aos níveis de Cu, Fe, Mn e Zn. Os teores de Si e B, nos solos, não apresentaram incrementos para as doses testadas. Na segunda etapa, em todas as características avaliadas, nos solos testados, os valores médios obtidos foram superiores à testemunha, sendo observados efeitos significativos para o DC, IAFE e a MS no RQ e, no PAd, para o IAFE e a MS. Conclui-se que o PRB apresentou eficiência agronômica efetiva, nas doses e solos testados, em relação aos atributos químicos dos solos, aumentando os teores de pH, P, S, Ca, Mg, K, Cu, Fe, Mn, Zn e diminuindo os teores de Al, H+Al e m%; aumentando os valores médios observados de MS na cultura do milho, atendendo aos critérios definidos pelo MAPA para ser registrado e utilizado como remineralizador de solo.

Palavras-chaves: *Zea mays* L., rocha silicática, bioinsumo.

ASSESSMENT OF THE AGRONOMIC EFFICIENCY OF BASALT ROCK POWDER AS A SOIL REMINERALIZER

ABSTRACT

Rocking is a soil management technique that uses a product from a natural source, as in this case, rock dust, which under appropriate conditions in geochemical, mineralogical and granulometric terms is given as a soil remineralizer. Thus, the objective of this study was to evaluate the agronomic efficiency of Pó de Rocha Basáltica (PRB) as a soil remineralizer (RM) and nutrient source for corn in two soils with different textures. After the identification and characterization of PRB through chemical, mineralogical, physical and physicochemical analyses, experiments with doses of PRB began. In the first stage, doses were incubated in two soils: Quartzarenic Neosol – RQ and Dystrophic Yellow Argisol - PAd, contained in 10 kg polyethylene plastic bags. PRB doses were 0.0, 7.5, 15.0, 30.0 and 60.0 t ha⁻¹ for RQ and 0.0, 10.0, 20.0, 40.0 and 80.0 t ha⁻¹ for PAd, with four replications for each soil, totaling 40 experimental units, and the pots arranged in a completely randomized design, in greenhouse. After 60 days of incubation, the chemical attributes of the soils were evaluated: pH, M.O., P, S, Ca, Mg, K, Al, H+Al, SB, CTC, V%, m%, in addition to the available levels of Si, B, Cu, Fe, Mn and Zn. In the second stage, from the experimental units of stage I, two experiments with the culture of corn were installed. The treatments were given by the doses of PRB given in stage I, with four replications, totaling 20 experimental units for each soil. To evaluate agronomic efficiency, the characteristics analyzed were plant height (AP), stem diameter (DC), estimated leaf area index (IAFE), chlorophyll content (TC) and shoot dry matter mass (DM). The data obtained in the two stages were submitted to analysis of variance by the F test, at the level of 5% of probability, followed by polynomial regression analysis for the effect of doses. For agronomic characteristics, the Tukey test was also applied, at 5% probability. In the first stage, the application of doses of PRB increased the attributes pH, SB, CTC, V(%) and decreased the contents of Al and H+Al and m% in both soils. As for the macronutrients P, S, Ca, Mg and K, it was observed for the same increases in a linear way in their contents, except for K in the RQ soil, which showed a quadratic distribution. Regarding the M.O. contents, there were no significant increases in both soils, between the proposed treatments. For micronutrients, linear increases occurred for both soils in terms of Cu, Fe, Mn and Zn. The levels of Si and B in the soils were reduced with the increment of the doses, in both soils. In the second stage, for the corn and sorghum crops, in all the evaluated characteristics, the average values obtained were superior to the control. Significant effects were observed for CD, IAFE and DM up to a dose of 30.0 t ha⁻¹ for RQ and, for PAd, it was observed, with significant effects for IAFE and DM up to a dose of 20.0 t ha⁻¹. It is concluded that the PRB presented effective agronomic efficiency, in the doses and soils tested, in relation to the chemical attributes of the soils, increasing the contents of pH, P, S, Ca, Mg, K, Cu, Fe, Mn, Zn and decreasing the Al, H+Al and m% contents; increasing the average values of DM observed in the maize crop, meeting the criteria defined by MAPA to be registered and used as a soil remineralizer.

Key-words: *Zea mays* L., silicate rock, bioinput.

1. INTRODUÇÃO

A busca pela sustentabilidade nos sistemas agrícolas tem feito com que pesquisas se desenvolvam na área de bioinsumos e encontrem soluções para uma nova agricultura, moderna e produtiva. O aumento da população mundial, projetado para os próximos 30 anos (2050) traz consigo a necessidade de alimentar mais de 9,7 bilhões de pessoas, e que até o ano de 2030, tem-se o imenso desafio em diminuir o número de pessoas famintas no mundo, uma vez que por mais de uma década, esse número tem aumentado linearmente (FAO, 2019).

O uso de produtos de origem natural pode minimizar a demanda por fertilizantes inorgânicos nos sistemas produtivos, sendo um fato positivo, uma vez que a aquisição e preparo desses fertilizantes tem um alto custo. Dentro desta premissa, é necessário pesquisar o potencial de produtos capazes de garantir os processos agrícolas e ainda manter a qualidade alimentar dos produtos e subprodutos gerados, por meio de um manejo sustentável. Para isso, é importante considerar ações positivas para com a base da produção, que são os solos.

O Brasil possui solos de origem tropical, com elevado nível de intemperismo e pobreza em nutrientes. O uso de tecnologias de manejo, muitas das vezes, oriundas de regiões de climas temperados, dificulta e limita a produção. Tal fato é relevante quanto aos gastos com fertilizantes minerais importados, limitando processo produtivo, uma vez que o país depende de mais de 30 milhões de toneladas, a um custo que supera os 9 bilhões de dólares, encarecendo a produção e os custos dos alimentos (ANDA, 2020). Deste modo, partindo-se do tripé do conceito sustentável com base nas condições econômicas, sociais e produtivas, novas fontes alternativas de produção para a base dos sistemas agrícolas, como uso de fertilizantes, devem ser obtidas, melhoradas e analisadas, como é o caso da rochagem para a obtenção de remineralizadores de solos.

Esse processo pode reduzir os custos e os impactos ambientais causados por fertilizantes inorgânicos, que por tratar-se de um produto de fonte natural multielementar é benéfico aos solos. Alguns trabalhos demonstram que a aplicação de pó de rocha como remineralizador de solos trazem benefícios, melhorando condições do solo para o crescimento das plantas, com incrementos no pH do solo, CTC e nutrientes disponíveis por meio de rocha granítica (SILVA et al., 2013), basalto (RAMOS et al. 2014), fonólito (TAVARES et al., 2018) e andesito (DALMORA et al. 2020a).

As aplicações destas fontes de pós de rochas para os diferentes sistemas de cultivos, deram origem aos agrominerais regionais, outro fator de extrema importância na garantia da produção e logística desse processo. Assim, o presente trabalho é relativo ao

estudo do pó de basalto, como potencial remineralizador de solos. O estudo compreende a caracterização da eficiência agrônômica do pó de rocha basáltica como remineralizador (RM) de solo e fonte de nutrientes em dois solos com texturas distintas, analisados após o processo de incubação durante 60 dias e, o desenvolvimento e crescimento inicial de plantas para diferentes culturas, em vasos sob condições controladas de casa de vegetação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Rochagem e Remineralizadores de solos

A adição de remineralizadores aos solos de baixa fertilidade é uma prática que visa a reestruturação da fertilidade. A técnica da rochagem, remineralização de solos ou petrofertilização, está fundamentada nas descrições de processos da agrogeologia (VAN STRAATEN, 2002). O uso do pó de rocha possibilita uma melhor fertilidade dos solos, melhoria dos aspectos nutricionais e conservação dos recursos naturais por períodos mais longos, promovendo um efeito residual nos solos em que é aplicado. A aplicação de pó de rocha no solo melhora as condições do solo para o crescimento das plantas, com incrementos no pH do solo, CTC e disponibilidades de nutrientes e redução da saturação de alumínio (SILVA et al., 2013).

Estudos realizados por Theodoro et al. (2000, 2010) indicam que os custos para aquisição de pós de rochas são cerca de 60 a 70% menores que os dos insumos convencionais. Sem gasto excessivo e sem aumentos significativos nos custos dos fatores de produção, tais como correção e adubação dos solos, base para implantação e sucesso dos sistemas agrícolas e, somando-se a isso o fato de que o Brasil é detentor de uma imensa geodiversidade, o que garante a ocorrência de vários tipos de rochas (basaltos, kamafugitos, carbonatitos, fonolitos, serpentinitos, xistos, filitos, margas e alguns tipos de granitos e gnaisses) com potencial adequado para este fim em todas as regiões do país.

Os resultados preliminares mostram que os diferentes tipos de rochas apresentam comportamentos diferenciados em termos de alteração dos níveis de fertilidade, bem como de produtividade agrícola. Porém, todos os resultados foram positivos quando comparados às parcelas controles. Esse uso garante o aumento da disponibilidade dos principais macronutrientes (K, P, Ca e Mg), contribuindo com a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, podendo diminuir o uso ou até mesmo zerar esse, em relação aos fertilizantes minerais (THEODORO et al., 2013). O uso de pós de rochas como remineralizadores de solo apresenta-se com uma alternativa adequada para manutenção

da fertilidade do solo e, com isso favorecer a produção agrícola (MANNING e THEODORO, 2018).

Fertilizantes solúveis podem salinizar solos, nitrificar rios, contaminar lençóis freáticos e tornar cada vez mais o agricultor dependente de uma tecnologia finita para a produção. Gonçalves et al. (2013) destacam que a principal ameaça dos fertilizantes solúveis seria a poluição das águas superficiais durante os usos, principalmente no preparo e plantio das culturas. West et al. (2014) também relatam que existe uma preocupação em relação ao uso ineficiente dos nutrientes minerais, que resulta em acúmulo, podendo gerar efeitos negativos ao meio ambiente, como aumento dos gases de efeito estufa e acúmulo em águas subterrâneas e costeiras.

As pesquisas têm demonstrado que o pó de rocha libera lentamente grandes quantidades de nutrientes às plantas, podendo elevar a CTC de solos de baixa fertilidade (BLUM et al., 1989 a,b), os teores de cátions trocáveis e o pH do solo (VON FRAGSTEIN et al., 1988), sendo esses efeitos mais intensivos em rochas vulcânicas básicas, como basalto. Na Alemanha, a aplicação de 10 t ha⁻¹ de basalto nas Florestas Negras do Norte aumentou os teores de Ca e Mg e o pH do solo (HILDEBRAND e SCHARCK-KIRCHNER 2000). Van Straaten (2006) ressalta que em clima tropical, o uso de pó de rocha tem grande potencialidade, uma vez que as taxas de dissolução dos minerais e as reações entre a superfície dos minerais e a solução do solo são aumentadas sob alta temperatura e regime de umidade alta.

Melo et al. (2012) relataram em sua pesquisa que a dose de 50 t ha⁻¹ de basalto proporcionou a máxima redução da acidez ativa, elevando o pH em água de 4,8 até 5,5, promovendo aumento nos teores de cálcio, magnésio, zinco, ferro e cobre no solo e, que o efeito da adição das doses de basalto apresentou, também, maior eficiência para a neutralização da acidez potencial, de forma que o pó de rocha basáltica possa ser considerado como uma fonte alternativa de fertilizante e corretivo do solo, dependendo da composição, granulometria do pó de rocha e condições do solo.

A exploração de rochas silicáticas pela indústria de mineração, produz resíduos que podem ser utilizados na agricultura como fertilizantes, dependendo dos minerais em sua composição. Esses componentes da rocha contribuem para aumentar a fertilidade do solo a médio e longo prazo, de acordo com sua solubilidade e reação com o solo, contendo P, K, Ca e Mg, também micronutrientes, como Zn e Mn (VAN STRAATEN, 2007). Ainda, Machado et al. (2016) corrobora com essas condições de usos, uma vez que com uma única aplicação pode-se ter eficiência por até quatro ou cinco anos. Esta é uma questão relevante em que a contínua aplicação de fertilizantes, especialmente como superfosfatos, resultou em toxicidade de cádmio (Cd) em solos em todo o mundo (GREGER et al., 2016).

O uso como remineralizador do solo não precisa de processamento químico, ou seja, pode ser usado como é extraído, de forma “in natura” (SILVA et al., 2013). Há uma notória produção de subprodutos da região vulcânica na mineração de rochas no sul do Brasil (DALMORA et al., 2016). Esses subprodutos são acumulados ao lado de pedreiras diferentes, necessitando de uma disposição final correta (KORCHAGIN et al., 2019), contribuindo assim para solução de mais um passivo ambiental. Assim, a aplicação de rejeitos da mineração na agricultura deve ser considerada como alternativa para remineralizar solos empobrecidos em nutrientes. Seu uso requer caracterização mineralógica e química e avaliação de seu desempenho agrônômico para seu emprego (KORCHAGIN et al., 2019). Essa abordagem contribui para a solução de questões ambientais associadas na mineração de rochas e cria uma alternativa mais limpa para a correção e fertilização dos solos.

A lei Federal Nº 12890 inclui os remineralizadores de solo como uma categoria de insumo destinado à agricultura e traz especificações claramente definidas por regulamentação apropriada. Os remineralizadores do solo são materiais minerais que possuem apenas redução de tamanho e classificação granulométrica por meio de processos mecânicos, e que em função do aumento da área específica de contato, podem alterar os índices de fertilidade do solo pela adição de macro e micronutrientes e melhorar a qualidade física, propriedades físico-químicas e a atividade biológica dos solos (BRASIL, 2013 e 2016; DALMORA et al., 2020a).

A eficiência agrônômica dos pós de rochas silicáticas depende da geoquímica, mineralogia e granulometria das rochas moídas na sua obtenção e das condições edafoclimáticas, uma vez que a transformação dos minerais das rochas no solo ocorre na rizosfera das plantas, aumentando a liberação de nutrientes e impulsionando a formação de novos minerais com elevada superfície específica e carga superficial negativa, aumentando a capacidade de troca de cátions efetiva do solo (MARTINS et al., 2014).

Segundo Manning e Theodoro (2018), a determinação da dinâmica dos minerais e a liberação de nutrientes das rochas, além da compreensão dos processos de intemperismo e alteração de minerais, é fundamental para neutralizar a acidez nos solos e atuar como fonte de nutrientes para as culturas agrícolas, pelas aplicações de pós de rochas. Além dos baixos custos de aquisição e diminuição dos impactos ambientais causados por fertilizantes inorgânicos e pelo controle de um passivo ambiental da mineração, Resende et al. (2006) indicam em seu estudo que com o uso dessa tecnologia tem-se a liberação de nutrientes das rochas de forma lenta e gradual, o que reduz as perdas por lixiviação e favorece uma liberação a longo prazo, com materiais alcalinizantes atuando como condicionadores de solos.

Os solos no Brasil são de origem tropical com elevado nível de intemperismo e pobreza em nutrientes tais como cálcio, fósforo, magnésio e potássio. O uso da rochagem como prática agrícola e a adequação dos remineralizadores de solos, tem potencial para diversas regiões do país. Desta forma é necessária a “calibração” do seu uso, garantindo uma recomendação adequada para cada tipo de solo e culturas agrícolas, em doses fixas ou parceladas do produto, de modo eficiente.

2.2 Uso de Agrominerais Silicáticos

O uso de agrominerais silicáticos tem sido destaque com a aplicação dos pós de rochas nos sistemas agrícolas. É um termo dado aos minerais de rochas ou resíduos da mineração e metalurgia que apresentem eficiência agrônômica e tragam benefícios a tais sistemas, como opção para correção, adubação ou condicionamento dos solos.

Esses agrominerais são proventos de diversos tipos de rochas, que apresentam teores distintos de macro e microelementos essenciais para as culturas agrícolas. Em diversos estudos, destacam-se o potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg). É necessário, no entanto, ressaltar que as rochas silicáticas não possuem alta taxa de solubilidade, quando comparadas aos fertilizantes e corretivos solúveis.

As rochas são corpos sólidos formados através da agregação de minerais, podendo ser compostas de um ou de vários tipos desses. A maioria das rochas originaram-se de um estado ígneo, chamado de magma que, sob elevadas temperaturas são ejetadas do interior da Terra para a superfície através dos vulcões. Essas rochas na superfície irão apresentar diferenciações, as quais estão ligadas a determinados fatores como: composição química, origem, textura, estrutura, declive, cobertura vegetal, tempo geológico e tipo de clima, dentre outros (MACHADO et al., 2003).

O basalto é considerado uma rocha vulcânica extrusiva, pois é resultante da solidificação rápida da lava na superfície. A mineralogia principal de um basalto é constituída principalmente por piroxênios e plagioclásio. Pode incluir olivina, quartzo, feldspato potássico, piroxênios, anfibólios, micas, olivina, feldspatoides (leucita, nefelita, sodalita, zeolitos sódicos), hematita, ilmenita, magnetita, rutilo, dentre outros. Na composição química dos minerais das rochas ígneas vulcânicas, ocorre uma maior frequência de óxidos, sendo o de maior importância o óxido de silício (SiO_2), cuja porcentagem em peso pode variar de 25 a 75%. Em segundo lugar vem o óxido de alumínio (Al_2O_3), que varia entre 12 e 18%. Outros óxidos podem estar presentes, como: óxido de ferro, óxido de manganês, óxido de magnésio e outros de sódio, potássio e cálcio (Turner; Verhoogen (1960), citados por KNAPIK, 2005).

Os basaltos de uma forma geral apresentam características geoquímicas e mineralógicas que melhoram os atributos físico-químicas dos solos (MELO et al., 2012), e os principais parâmetros químicos e mineralógicos necessários para registro como remineralizador de solos: soma de bases superior a 9%; proporção de sílica livre (quartzo) inferior a 25%; elementos traços potencialmente tóxicos (Pb, Cd, Hg, As) inferior aos limites máximos. Por outro lado, atualmente as normas limitam o registro geral dos basaltos como remineralizadores de solos, uma vez que nem todos apresentam teor mínimo de 1% de K_2O .

Os elementos químicos existentes nessas rochas que podem ser facilmente liberados são Ca, Mg e K, e os que podem ser concentrados residualmente são Fe, P e elementos traços. Assim, solos originados de rochas basálticas tendem a ser mais ricos em Fe, P, Ca, Cu e Zn e, por outro lado, tendem a ser mais pobres em B e Mo (RESENDE et al., 2002). Os basaltos são considerados rochas básicas, tidas como um importante material de origem de solos, contribuindo para sua fertilidade em função do predomínio de minerais facilmente intemperizáveis e ricos em cátions, destacando-se os feldspatos cálcio-sódicos e piroxênios (RESENDE et al., 2002).

Para a agricultura, portanto, o basalto é uma rocha importantíssima pois o produto de sua decomposição é uma argila de coloração avermelhada que origina solos férteis (KNAPIK, 2005). Cristan (2002) citado por Knapik (2005), também corrobora ao estudar a liberação dos nutrientes do pó de basalto, tratando-a como gradual e contínua, e que por meio de estudos recentes no Brasil, o indicam como potencial recuperador de pastagens e de canaviais.

O comportamento dos agrominerais e as taxas de dissolução mineral podem ser influenciados pela presença de ligantes orgânicos, pois esses ligantes podem se ligar a cátions metálicos em solução ou podem formar complexos na superfície mineral que melhoram a sua dissolução. Os efeitos da dissolução são fortemente dependentes do ligante, da espécie mineral e do pH (VAN NOORT et al., 2018). Também dever-se-á considerar sua maior eficiência quando associado à moléculas orgânicas solubilizantes de rochas que podem ser produzidas por microrganismos, incluindo bactérias, fungos e micorrizas presentes no solo (SONG et al., 1988). Moléculas orgânicas secretadas por plantas ou microrganismos podem formar complexos metal-orgânicos que promovem a dissolução do pó de rocha.

Ainda, tem-se muito mais para explorar com a adoção do uso de pós de rochas, como por exemplo, a diminuição de carbono no ambiente agrícola, pelo sequestro de carbono (CO_2), através do intemperismo dos minerais de silicato (BEERLING et al., 2018; HANGX e SPIRES, 2009; GUDBRANDSSON et al., 2011 e; SCHUILING e KRIJGSMAN, 2006). Ramos et al. (2020) relatam que ao estudarem um pó de rocha vulcânica (dacito)

observaram um potencial do mesmo tanto para ser uma solução ambiental quanto para o problema de fertilização do solo, pois não requer processamento químico e pode ser usado à medida que é extraído.

2.3 Cultura do Milho

A cultura do milho apresenta-se em várias cadeias agropecuárias brasileiras, das quais se destaca sua importância para alimentação humana e animal, além de outros produtos secundários, como a extração de etanol e forragem. A produção de milho vem sendo pautada por duas safras anuais e principais, muito características no país, em que desde 2007, são tratadas por primeira e segunda safras.

Na primeira safra, para o ano corrente 2021/22, a estimativa é de 115,6 milhões de toneladas de milho. Já em relação à segunda safra, para o respectivo ciclo, a estimativa é de 88,4 milhões de toneladas. Dentro deste contexto, podemos afirmar a importância da segunda safra, movida pelo uso preferencial da soja na primeira safra. Ainda, há locais em que se faz uma terceira safra de milho, sendo menos expressiva, mas também computada, com expectativa de crescimento de 12,5% da área plantada, devendo alcançar 670 mil hectares. Desse total, a cultura produz aproximadamente 115,66 milhões de toneladas no país, ocupando uma área total de cerca de 21.665,8 mil hectares, nas três safras (CONAB, 2022).

Nos últimos anos, a cultura do milho vem alcançando sucessivos ganhos de produtividade em função das tecnologias empregadas na semente e no manejo empregado nos diferentes sistemas de produção (BORGHI et al., 2017).

Para tanto, o conhecimento das exigências nutricionais da cultura do milho estão relacionadas com o potencial que poderão expressar, em função dos ambientes de cultivos que será explorada, junto à finalidade de produção. Vale ressaltar que o milho extrai muito rapidamente os nutrientes dos solos, devido ao rápido ciclo que apresenta. No caso do milho, é interessante notar que quanto mais produtiva for essa cultura, maior será a extração de nutrientes (VON PINHO et al., 2009).

Observa-se que a extração de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio aumenta linearmente com o aumento na produtividade. Os nutrientes mais demandados pela cultura do milho são o nitrogênio e o potássio, seguidos por cálcio, magnésio e fósforo. Com relação aos micronutrientes, as quantidades requeridas pelas plantas de milho são muito pequenas. Para uma produtividade de 9 t de grãos/ha, são extraídos: 2.100 g de ferro, 340 g de manganês, 400 g de zinco, 170 g de boro, 110 g de cobre e, 9 g de molibdênio. Entretanto, a deficiência de um deles pode ter tanto efeito na

desorganização de processos metabólicos e redução na produtividade, como a deficiência de um macronutriente como, por exemplo, o nitrogênio (COELHO, 2006).

Do ponto de vista fisiológico, a nutrição das plantas é uma atividade bastante complexa e completa. Fráguas e Silva (1998) observaram que o estado nutricional das plantas é refletido em função do balanço que se obtém entre a absorção e o transporte dos nutrientes, através da fertilidade natural dos solos e, ou da adição de fertilizantes, para os gastos exigidos pela evolução vegetativa da planta e sua produção. O condicionamento dos solos como base para um bom desenvolvimento das culturas deve ser considerado, uma vez que a ocorrência de desordem nutricional está frequentemente relacionada com as condições de solo (MAGALHÃES, 1988). Neste contexto, a técnica de rochagem tem sua importância nos respectivos sistemas de cultivo.

3. OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência agrônômica do pó de rocha basáltica (PRB) da Baú Mineração S/A, localizada na Área Rural, Nº KM 75, Rodovia MA 34km 75, Caxias no estado do Maranhão como um remineralizador de solos, por meio de experimentos desenvolvidos em ambiente controlado, utilizando solos com atributos químicos e físicos contrastantes. Em uma primeira etapa foi avaliada a fertilidade do solo após 60 dias de incubação e, numa segunda etapa, foram avaliadas as características agrônômicas da cultura do milho, nos solos provenientes da primeira etapa. Ainda, com essa premissa e como objetivos específicos, o PRB foi classificado em função da sua constituição geoquímica, mineralógica, física e físico-química, junto aos atributos químicos dos solos e o desenvolvimento e crescimento inicial da referida cultura.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização das Amostras de Pó de Rocha Basáltica

Os estudos de caracterização de pós de rochas silicáticas como remineralizadores de solos seguem a Lei 12.890/2013 (BRASIL, 2013), que definiu este novo tipo de insumo mineral para a agricultura, e a sua regulamentação pela Instrução Normativa 5 de 2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), onde foram determinadas as especificações e garantias dos produtos (BRASIL, 2016).

A IN 5/2016 do MAPA (BRASIL, 2016) determina que o remineralizador de solos tenha as seguintes garantias mínimas, definidas em cinco critérios: soma de bases totais ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$) no mínimo 9%; teor mínimo de K_2O total de 1%; conteúdo máximo

de 25% de quartzo (sílica livre); concentrações máximas de elementos potencialmente tóxicos (arsênio - As, <15 mg kg⁻¹; cádmio - Cd, <10 mg kg⁻¹; mercúrio - Hg, <0,1 mg kg⁻¹; chumbo - Pb, <200 mg kg⁻¹); teste agrônômico que demonstre a eficiência da rocha em modificar as propriedades de fertilidade do solo e no desenvolvimento de plantas. Além desses critérios mínimos, a IN 5/2016 (BRASIL, 2016) obriga, também, a declaração do pH de abrasão do pó de rocha, e que sua granulometria esteja definida entre as três possíveis classes: farelado, pó ou filler.

Para caracterizar o pó de rocha de basalto (PRB), obteve-se uma amostra representativa de 10 kg do produto, subtraindo-se duas subamostras de 500 g. A primeira foi para a caracterização química com elementos de maior e menor percentual e a composição mineralógica quantitativa, realizadas no Laboratório CRTI da Universidade Federal de Goiânia, credenciado no MAPA como Instituição Oficial de Pesquisa (<https://www.crti.ufg.br/>). Por meio dos dados da análise química total (fluorescência de raios-X), a composição mineralógica foi obtida pelo método de Rietveld, com ajuste de composição calculada no difratograma de raios-X. Uma segunda amostra, foi enviada para a caracterização química dos elementos potencialmente tóxicos (Cd, Pb, Hg, As) e pH de abrasão, realizadas no Laboratório da Campo, no Centro de Tecnologia Agrícola e Ambiental, cadastrado junto ao MAPA (<http://www.campo.com.br/cta/analises-laboratoriais/>). Com os resultados obtidos, garantindo o cumprimento dos critérios mínimos de geoquímica, físico-química e mineralógicos definidos pela IN 5/2016 (Brasil, 2016), para remineralizadores.

4.2 Localização dos Experimentos

Os experimentos foram realizados em Casa de Vegetação, no Laboratório de Análises de Plantas do Departamento de Tecnologia, da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV-UNESP) e no Viveiro de mudas do Colégio Técnico Agrícola (CTA-UNESP), Câmpus de Jaboticabal, em Jaboticabal-SP, cujas coordenadas geográficas são latitude 21° 17' S, longitude 48° 18' W e, altitude 590 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen é do tipo *Cwa*, subtropical, relativamente seco no inverno, com chuvas de verão, apresentando temperaturas médias anuais acima de 22°C e precipitação de 1552 mm.

4.3 Desenvolvimento Experimental

4.3.1 Etapas de Desenvolvimento do Experimento

A primeira etapa de desenvolvimento experimental corresponde à fase de incubação do pó de rocha em dois solos de textura distintas (textura arenosa e média), objetivando testar a viabilidade do produto como remineralizador do solo. Na segunda etapa, após o referido período de incubação das unidades experimentais da primeira etapa, foi semeada a cultura do milho para avaliação dos efeitos da aplicação do pó de rocha de basalto (PRB) nas características agronômicas de plantas.

4.3.2 Primeira Etapa: Unidades experimentais, tipos de solo e análises químicas

Cada unidade experimental foi constituída por um saco de polietileno de 10 kg de capacidade, preenchido com 6,5 kg de um solo de textura arenosa (Neossolo quartzarênico - RQ) e um solo de textura média (Argissolo Amarelo distrófico - PAd). Para a escolha dos solos que foram utilizados, amostras da camada superficial (de 10 a 30 cm de profundidade) foram retiradas e enviadas para análises físicas e químicas em laboratório credenciado. Antes da instalação dos experimentos, as amostras de solo, depois de coletadas, foram secas ao ar e peneiradas em malha 4 mm. Posteriormente, subamostras foram peneiradas em malha de 2 mm. A terra fina seca ao ar foi homogeneizada e amostrada para caracterização dos aspectos físico-químicos, que seguem na Tabela 01.

A incubação foi realizada mediante a adição de cinco doses do pó de rocha (PRB) que foram incorporadas ao solo e foram determinadas de acordo com as características químicas de cada solo e do PRB em estudo. O macronutriente tirado como base para a recomendação de doses foi o Potássio (K), nutriente este, que encontra-se em baixas concentrações nos dois solos. As doses foram dadas em toneladas por hectare, sendo para o RQ: 0,0, 7,5, 15,0, 30,0 e, 60,0 t ha⁻¹ e para o PAd: 0,0, 10,0, 20,0, 40,0 e, 80,0 t ha⁻¹. A incubação ocorreu por um período de 2 meses (60 dias), mantendo-se a umidade do solo em aproximadamente 70% da capacidade máxima de retenção de água, por meio de pesagens semanais, com correção do peso pela adição de água deionizada. Os sacos plásticos permaneceram entreabertos com o auxílio de um cano de PVC de 3/4 polegadas de diâmetro, por 10 centímetros de comprimento, amarrados e envoltos com fitilho. No objetivo de manter as trocas gasosas do solo e mantendo a microbiologia do solo ativa (Figura 1).

Tabela 01. Atributos químicos e físicos para os solos antes do processo de incubação com pó de rocha de basalto (PRB). UNESP, Jaboticabal-SP, 2020.

ATRIBUTOS	UNIDADES	SOLOS ⁽³⁾	
		RQ	PAd
pH _{CaCl2} ⁽¹⁾	---	4,40	4,37
Matéria Orgânica ⁽¹⁾	g dm ⁻³	9,00	4,93
Fósforo ⁽¹⁾	mg dm ⁻³	5,00	5,02
Enxofre ⁽¹⁾	mg dm ⁻³	5,00	12,10
Cálcio ⁽¹⁾	mmol _c dm ⁻³	7,00	4,89
Magnésio ⁽¹⁾	mmol _c dm ⁻³	4,00	2,37
Potássio ⁽¹⁾	mmol _c dm ⁻³	1,00	0,72
Alumínio ⁽¹⁾	mmol _c dm ⁻³	2,00	1,46
H+Al ⁽¹⁾	mmol _c dm ⁻³	18,00	33,19
SB ⁽¹⁾	mmol _c dm ⁻³	12,00	7,98
CTC ⁽¹⁾	mmol _c dm ⁻³	30,00	41,17
V ⁽¹⁾	%	40,00	19,38
m ⁽¹⁾	%	14,29	15,49
B ⁽¹⁾	mg dm ⁻³	0,15	0,27
Cu ⁽¹⁾	mg dm ⁻³	0,40	0,10
Fe ⁽¹⁾	mg dm ⁻³	7,00	0,83
Mn ⁽¹⁾	mg dm ⁻³	1,80	0,70
Zn ⁽¹⁾	mg dm ⁻³	0,20	0,10
Areia (> 0,05 mm) ⁽²⁾	%	77,75	58,75
Silte (>0,002 até 0,05 mm) ⁽²⁾	%	8,30	13,75
Argila(<0,002 mm) ⁽²⁾	%	13,95	27,50

⁽¹⁾Raij et al., (2001); ⁽²⁾EMBRAPA (2011); ⁽³⁾RQ- Neossolo Quartzarênico e PAd - Argissolo Amarelo Distrófico.

Espera-se que com isso, a microbiologia do solo tenha um ambiente favorável ao seu desenvolvimento, uma vez que, o solo tenha umidade necessária e trocas gasosas, ambiente favorável para o desenvolvimento microbiano e disponibilidade dos nutrientes contidos nos minerais do pó de rocha em questão.

Após o período de incubação, subamostras de terra foram coletadas, cerca de 500 gramas de solo, secas ao ar, peneiradas em malha 2 mm e encaminhadas ao laboratório para a realização das análises de fertilidade do solo conforme protocolos analíticos descritos em Raij et al. (2001).



Figura 1. Processo de incubação dos solos, em vasos, durante um período de 60 dias: 1- Enchimento dos vasos e pesagem; 2- Aplicação do pó de rocha de basalto; 3- Adição de água deionizada até 70% da capacidade de campo; 4- Vasos na bancada e; 5- Procedimento para trocas gasosas. UNESP, Jaboticabal-SP, 2020.

4.3.3 Segunda etapa: Experimentos com culturas em vasos

Após o período de incubação dos solos com pó de rocha de basalto (PRB), nas respectivas doses para cada solo, foi semeada a cultura do milho (*Zea mays* L.), representada pelo híbrido da Pioneer P4285VYHR, produzidas na safra de 2018/19, adaptados à região.

Nesta etapa, os experimentos ocorreram em casa de vegetação, sob condições controladas utilizando as unidades experimentais da primeira etapa, constituídas por um saco de polietileno de 10 kg de capacidade, preenchido com 6,0 kg de um solo de textura arenosa (Neossolo quartzarênico - RQ) e um solo de textura média (Argissolo Amarelo distrófico - PAd). Para todos os tratamentos, nos vasos, após a incubação, foi realizada a adubação de semeadura básica aplicando, conforme Faquin et al. (2000), 127 kg/ha⁻¹ de Nitrogênio (N) na forma de uréia, 317,46 kg/ha⁻¹ de Fósforo (P) na forma de superfosfato simples e 238,09 kg/ha⁻¹ de Potássio (K) na forma de cloreto de potássio. Um dia após a adição dos fertilizantes (05/11/2020) foi realizada a semeadura da cultura do milho, com seis sementes por vaso, sendo, em seguida, realizado o desbaste deixando-se duas plantas por vaso. Aos 10 dias após a emergência das plantas (DAE), foi aplicada uma solução de micronutrientes (0,79 kg/ha⁻¹ de B como ácido bórico, 3,17 kg/ha⁻¹ de Cu como sulfato de cobre, 6,35 kg/ha⁻¹ de Zn como sulfato de zinco e 4,76 kg/ha⁻¹ de Mn como sulfato de manganês).

Ainda, além da adubação de base nos vasos, foi aplicada adubação de cobertura para fornecer N, K e S complementar para as culturas, de forma a garantir as necessidades mínimas para desenvolvimento das mesmas até os períodos propostos de avaliação, fornecendo 80 mg dm⁻³ de N e 25 mg dm⁻³ de K, na forma de sulfato de amônio e cloreto de potássio, respectivamente, aos 20 dias após a emergência das plantas. Ao longo do experimento, as unidades experimentais foram irrigadas diariamente com água

deionizada, mantendo a umidade do solo em aproximadamente 70% de capacidade de campo.

4.3.3.1 Características Agronômicas Analisadas

Aos 60 dias após a emergência (DAE), foram analisadas a altura de plantas (AP), o diâmetro de colmo (DC), o índice de área foliar estimado (IAFE), o teor de clorofila (TC) e a massa seca da parte aérea (MS).

A AP foi realizada medindo-se com uma fita métrica a altura das plantas, em centímetros, do colo das plantas até a bainha da última folha (cm planta^{-1}). O DC foi determinado com uso de paquímetro digital, dado em milímetros (mm planta^{-1}). Para o IAFE foram considerados o número de folhas, as dimensões das folhas (largura e comprimento, em $\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$) e, um coeficiente de transformação de 0,7, dado pela seguinte fórmula:

$$\text{IAFE} = (L \times C) \times 0,7$$

Em que: IAFE – índice de área foliar estimado ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$); L - largura da última folha desenvolvida (cm); C – comprimento da última folha desenvolvida (cm) e; 0,70 – coeficiente de transformação da fórmula.

O TC (teor de clorofila) foi determinado com uso de aparelho clorofilômetro, portátil marca ClorofiLOG[®], modelo CFL 1030 (Falker Automação Agrícola[®]), que por meio de sensores, analisa duas faixas de frequência de luz e pelas relações de absorção de diferentes frequências, fornece medições do teor de clorofila total, expressas em unidades dimensionais chamadas ICF (Índice de Clorofila Foliar), consideradas na pesquisa como TC (FALKER, 2008). A determinação da MS foi realizada após o corte rente ao solo da parte aérea das plantas (colo da planta), acondicionadas em sacos de papel que foram colocados em estufa com circulação forçada de ar, mantida a 60°C por 72 h ou até atingirem peso constante. Após, foram pesadas para obtenção da massa de matéria seca, em gramas por planta (g planta^{-1}).

4.3.4 Delineamento experimental e análises estatísticas

O delineamento experimental para a primeira etapa foi inteiramente casualizado (DIC). Os experimentos com os dois tipos de solos foram compostos por cinco doses do pó de basalto (PRB): 0,0; 7,5; 15,0; 30,0 e; 60,0 t ha^{-1} para o RQ e de 0,0; 10,0; 20,0; 40,0 e; 80,0 t ha^{-1} para o PAd, com quatro repetições cada, totalizando 40 unidades experimentais.

Na segunda etapa, utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado. Com os solos provenientes da primeira etapa foram instalados dois experimentos com 20 unidades experimentais cada (1 solo x 1 cultura x 1 fonte x 5 doses x 4 repetições), totalizando assim, as 40 unidades experimentais.

Os dados obtidos nas duas etapas foram submetidos à análise de variância pelo teste de F, ao nível de 5% de probabilidade, seguidos de análise de regressão polinomial das doses. Para as características agrônômicas, também, foi realizado o teste de Tukey, a 5% de probabilidade, por meio do software estatístico SISVAR (FERREIRA, 2019).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Caracterização do pó de rocha de basalto

A composição química do basalto (PRB) está apresentada na Tabela 2. Pode-se observar que a soma de bases (CaO + MgO + K₂O) do basalto é 13,89%, e o teor de K₂O de 1,60%. A soma de bases é superior a 9% e o óxido de potássio é maior que 1%, conforme o exigido pela Instrução Normativa 5 (Brasil, 2016).

Amostras de rocha, pulverizadas no Laboratório de Difractometria de Raios-X (LDRX) foram analisadas por fluorescência de raios-X para determinar a composição química de rocha total. Dos óxidos majoritários – SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, TiO₂, P₂O₅, Na₂O, K₂O, MnO e perda ao fogo. Os principais óxidos foram analisados por Fluorescência de Raios-X, espectrometria de massa e ICP (após fusão em metaborato de lítio/tetraborato, diluição em digestão nítrica e água régia). Perda por incineração (LOI) por diferença de peso após a ignição a 1000°C.

Tabela 2. Caracterização dos elementos químicos presentes na amostra de basalto. UNESP, Jaboticabal-SP, 2020.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	PF*	Total
49,8	12,43	15,24	8,19	4,10	2,71	1,60	0,20	0,66	4,13	<LQ**	0,67	99,71

*PF: Perda ao fogo; **<LQ: Abaixo do Limite Quantificável.

A partir dos dados da análise química total (fluorescência de raios-X), a composição mineralógica foi obtida pelo método de Rietveld. O método de Rietveld é uma técnica robusta para a análise quantitativa de fases minerais, através da difração de raios x. A quantificação de minérios de ferro com duas ou mais fases é possível de ser realizada em uma pequena fração de tempo (KÖNIG, 2002). Os resultados da composição mineralógica do material minério primário estão na Tabela 3.

Tabela 3. Caracterização mineralógica da amostra de basalto. UNESP, Jaboticabal-SP, 2020.

Mineral	Fe-Augita	Ulvoespinélio	Ilmenita	Hematita	Magnetita	Apatita	Ortoclásio
%	22,35	<LQ	6,24	0,59	2,79	<LQ	7,40
Mineral	Muscovita	Esmectita	Quartzo	Labradorita	Andesina	Mineral de baixa cristalinidade	Total
%	0,98	2,20	5,77	33,38	8,88	8,9	99,48

Augita - $\text{Ca}_{1,83}\text{Na}_{0,22}\text{Mg}_{3,41}\text{Fe}^{2+}_{1,26}\text{Al}_{0,23}\text{Fe}^{3+}_{0,05}\text{Mn}^{2+}_{0,02}\text{Ti}_{0,02}\text{Si}_{7,79}\text{Al}_{0,21}\text{O}_{22}(\text{OH})_2$; Ilmenita - FeTiO_3 ; Ortoclásio - KAlSi_3O_8 ; Muscovita - $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$; Esmectita - $(\text{Na},\text{Ca})_{0,3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2-n}(\text{H}_2\text{O})$; Labradorita - $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$; Andesina - $(\text{Na},\text{Ca})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$

A mineralogia do basalto indica uma composição típica de basaltos toleíticos de alto titânio (Tabela 3). Os minerais mais reativos perfazem 75,71% (WILSON, 2004). Os mais reativos são o piroxênio augita (22,35%) os plagioclásios labradorita (33,38%) e andesina (8,88%), a esmectita (2,20%), e o material de baixa cristalinidade (8,9%). Esses minerais podem fornecer cálcio, magnésio, silício e fósforo, além de micronutrientes (cobre, níquel, zinco, cobalto, manganês) nos curto e médio prazos (SILLANPÄÄ, 1972).

Os materiais de baixa cristalinidade, além de apresentarem alta reatividade, apresentam também elevada superfície específica, muito importante na interação biológica do solo (CUADROS, 2017). O ortoclásio (7,4%) e a muscovita (0,98%) são minerais de baixa reatividade, mas que podem fornecer potássio, nos médio e longo prazos.

Os minerais considerados quimicamente inertes são os óxidos hematita, magnetita, ilmenita, ulvoespinélio e o quartzo, perfazendo 15,39%. Os óxidos de titânio (teor total 4,13%, Tabela 1), como a ilmenita e o ulvoespinélio, podem ser minerais importantes na adsorção de compostos de nitrogênio no solo por processos fotocatalíticos (BARRÓN et al., 2020).

Desta forma, o teor de sílica livre (quartzo) perfaz somente 5,77% do basalto, muito abaixo do limite máximo de 25% determinado pela Instrução Normativa 5 do MAPA (BRASIL, 2016).

Pode-se verificar que os elementos potencialmente tóxicos do basalto estão em níveis abaixo dos limites máximos permitidos pela IN 5/2016 do MAPA (arsênio - As, <15 mg kg^{-1} ; cádmio - Cd, <10 mg kg^{-1} ; chumbo - Pb, <200 mg kg^{-1} ; mercúrio - Hg, <0,1 mg kg^{-1}) para remineralizadores de solos (Tabela 4).

Tabela 4. Caracterização química dos elementos potencialmente tóxicos da amostra de basalto. UNESP, Jaboticabal-SP, 2020.

Elemento	Arsênio (As)	Cádmio (Cd)	Chumbo (Pb)	Mercúrio (Hg)
mg kg^{-1}	<0,1	< 1,0	<1,0	< 0,1

O pH de abrasão é de 9,09, mostrando que o basalto é alcalino. Isto se deve à hidrólise das bases presentes na amostra a partir dos minerais silicáticos (GILLMAN, 1980).

6.2 Experimentos com solos e incubação do pó de rocha de basalto

Após o período de 60 dias de incubação, com adição das cinco doses de pó de rocha de basalto (PRB), em função de cada solo avaliado, notou-se um incremento de forma linear ou quadrática dos atributos químicos, tais como pH, SB, CTC, V%, P, S, Ca, Mg, K, Cu, Fe, Mn e Zn, reduzindo os teores de Al trocável dos solos, acidez potencial (H+AL) e saturação por Al (m%) quando comparado à caracterização química dos solos antes da incubação e instalação dos experimentos. Os teores de M.O. não foram influenciados pelas doses adicionadas de PRB (Figuras 2 a 6).

O aumento das doses do PRB promoveu aumento linear nos valores médios do pH, variando de 5,32 – 6,39 no RQ e 5,76 – 6,55 no PAd, entre os tratamentos controles e as maiores doses, respectivamente (Figura 5). Esse aumento nos valores do pH do solo evidencia o efeito corretivo do PRB, abrangendo uma faixa de aumento do pH de 5,51 para 6,39 no RQ ($R^2 = 98,79\%$) e de 6,03 para 6,55 no PAd ($R^2 = 82,20\%$), o que se torna benéfico para as plantas se desenvolverem, pois aumenta a disponibilidade dos nutrientes. As doses de 30,0 e 60,0 t ha⁻¹ apresentaram diferenças significativas em relação ao tratamento sem PRB, enquanto as doses de 7,5 e 15,0 t ha⁻¹ não, porém apresentaram valores médios maiores para o RQ. No PAd, observou-se uma variação menor nos valores de pH, apesar das maiores doses aplicadas do PRB, possivelmente relacionado ao maior poder tampão desse solo, ou seja, devido à maior quantidade de minerais de argila presente neste solo, o mesmo apresenta maior resistência à variação do pH.

Em relação aos teores médios de alumínio (Al), acidez potencial (H+Al) e saturação por alumínio (m%) nos solos, ambos apresentaram diminuição dos valores médios quando do aumento das doses do PRB de forma linear. Na Figura 5, pode-se observar variações de 0,25624 a 0,00001 mmol_c dm⁻³ para o RQ, do tratamento controle para a maior dose de PRB (60,0 t ha⁻¹), sendo significativa para as doses de 30,0 e 60,0 t ha⁻¹ e de 0,00047 a 0,00001 mmol_c dm⁻³ para o PAd, porém sem diferenças significativas das doses para com a testemunha (sem PRB). A redução dos teores de Al mediante a aplicação de pó de rocha no solo melhora as condições para o crescimento das plantas, uma vez que o Al é um elemento tóxico para as plantas, por causar danos fisiológicos, principalmente ligados ao sistema radicular, como morte de meristema apical, favorecer

a suscetibilidade das culturas ao estresse hídrico e outras alterações morfológicas, dadas ao declínio ou déficit nutricional.

Silva et al. (2013) observaram incrementos no pH do solo, CTC, disponibilidades de nutrientes e redução da saturação de alumínio com uso de pós de rochas. Von Fragstein et al. (1988) relataram que o pH dos solos tendem a aumentar quando do uso de rochas vulcânicas básicas, como basalto, com efeitos mais intensos, corroborando com os dados observados neste relatório.

Com a adição do PRB, houve reduções nos teores médios de H+Al e m%, o que pode favorecer o desempenho de plantas e ainda melhorar os índices de soma de bases, pela maior disponibilidade de nutrientes nos solos e capacidade de troca de cátions, propiciando um aumento da saturação de bases (V%).

Os teores médios de H+Al reduziram de 10,37 até 8,93 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ($R^2 = 80,06\%$) para o RQ e de 12,38 até 10,22 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ($R^2 = 79,67\%$) para o PAd, de forma linear. As doses de 7,5 e 15,0 t ha^{-1} e de 10,0 t ha^{-1} de PRB não apresentaram diferenças significativas em relação à testemunha para o RQ e PAd, respectivamente. O mesmo foi observado para m%, com valores médios reduzidos, respectivamente, de 1,63769 até 0,00001 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ para o RQ e de 0,00434 até 0,00001 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ para o PAd de forma linear, e significativa apenas para o RQ nas doses de 30 e 60,0 t ha^{-1} . As proporções de m% nos solos foram relativamente baixas, após o período de incubação dos solos, o que dificulta uma precisão maior dos valores médios, dada a variação, em função da presença ou ausência na amostragem, fato que possibilitou um aumento nos coeficientes de variação, porém sem descartar a ação redutora da saturação por alumínio (m%) do produto para as doses testadas (Figura 2).

Junto com Von Fragstein et al. (1988), os autores Blum et al. (1989 a,b) demonstraram que o pó de rocha libera lentamente grandes quantidades de nutrientes às plantas, podendo elevar a CTC de solos de baixa fertilidade, os teores de cátions trocáveis e o pH do solo, como visto.

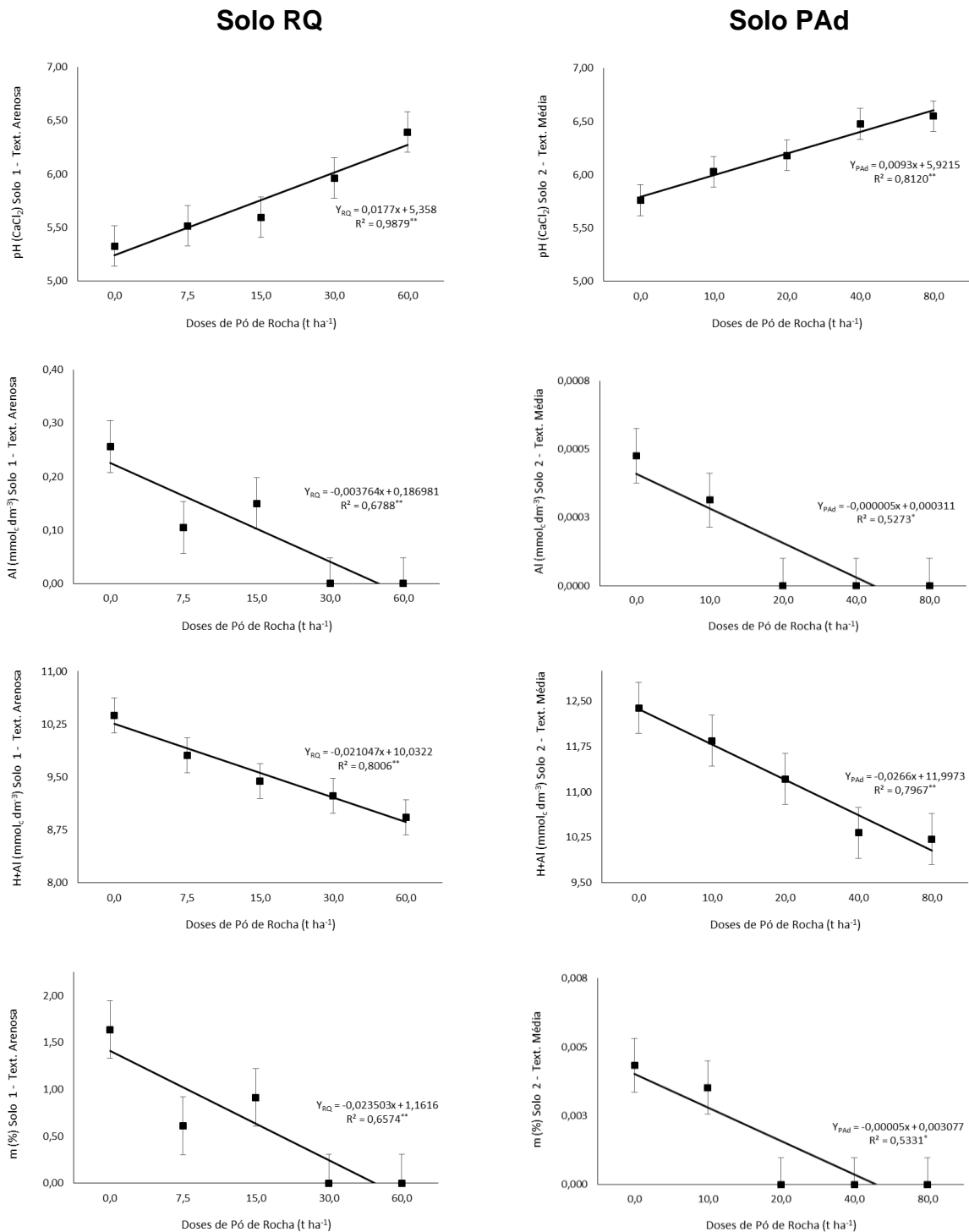


Figura 2. Acidez ativa - pH, teor de Al, acidez potencial - H+Al e saturação por Al (m%) obtidos no Neossolo Quartzarênico (RQ) e Argissolo Amarelo Distrófico (PAd) após 60 dias de incubação do pó de rocha de basalto. **, * e ns – Significativo a 1%, 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. UNESP, Jaboticabal-SP, 2020.

Na Figura 3, nota-se os aumentos lineares e significativos nos teores médios proporcionados pelas doses de PRB na soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC) e na saturação de bases (V%), de ambos os solos estudados.

Tal fato faz-se notar pela resposta ou reatividade apresentada pelo PRB nos solos, se considerado o tempo de 60 dias de incubação dos mesmos. Essa condição é vista em sistemas agrícolas degradados e que buscam recuperação duradoura de seus processos,

uma vez que além dessa reatividade apresentada, o pó de rocha basáltica garante uma liberação lenta dos nutrientes, mantendo e ampliando esta condição nos solos.

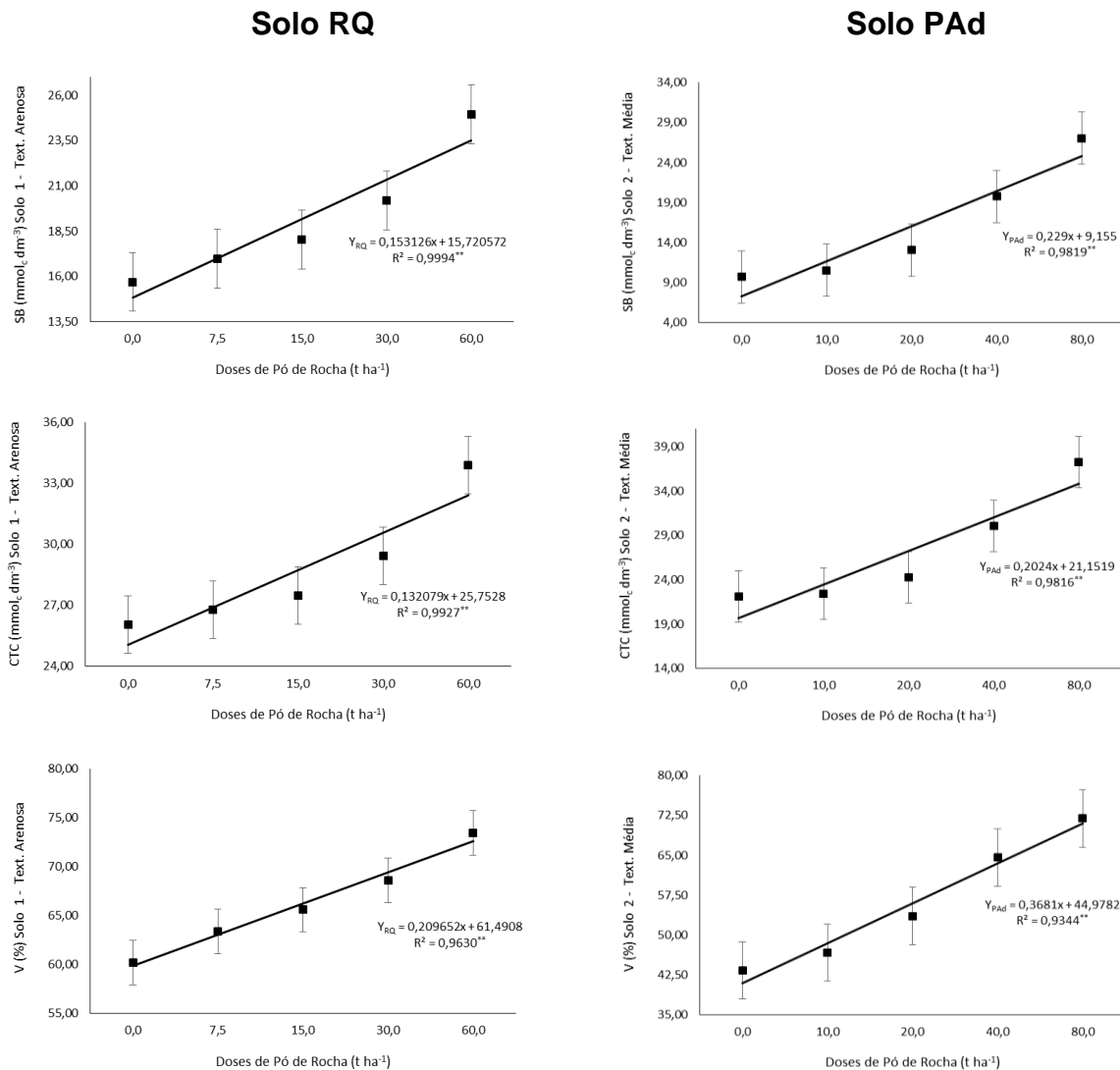


Figura 3. Soma de Bases – SB, Capacidade de Troca Catiônica – CTC, e Saturação por Bases – V% obtidos para o Neossolo Quartzarênico (RQ) e Argissolo Amarelo Distrófico (PAd), após 60 dias de incubação do pó de rocha de basalto (PRB). **, * e NS – Significativo a 1%, 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. UNESP, Jaboticabal-SP, 2020.

Os aumentos na SB, dos dois solos testados, favoreceram a elevação, também, dos teores médios da CTC dos mesmos. Os valores de SB variaram de 15,68 a 24,95 mmol_c dm⁻³ ($R^2 = 99,94\%$) para o RQ e de 9,71 a 27,02 mmol_c dm⁻³ ($R^2 = 98,19\%$) para o PAd, com aumentos lineares em relação à testemunha e significativos para as doses de 30 e 60,0 t ha⁻¹ para o RQ e 40 e 80,0 t ha⁻¹ para o PAd (Figura 3).

De acordo Theodoro et al. (2013) os resultados preliminares dos seus testes com solos mostram que os diferentes tipos de rochas apresentam comportamentos diferenciados em termos de alteração dos níveis de fertilidade, bem como de produtividade agrícola. Porém, todos os resultados foram positivos quando comparados às parcelas controles. Esse uso garante o aumento da disponibilidade dos principais

macronutrientes (K, P, Ca e Mg), contribuindo com a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, podendo diminuir o uso ou até mesmo zerar esse, em relação aos fertilizantes minerais. Essa condição é observada neste estudo, uma vez que o aumento das SB também ocorre devido aos aumentos dos teores médios dos nutrientes cálcio, magnésio e potássio (Figura 4).

A contribuição do aumento da SB nos dois solos, influi nos aumentos da CTC e do V%. Pela Figura 3, observa-se que a CTC aumentou linearmente, em valores médios, de 26,06 a 33,88 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ($R^2 = 99,27\%$) para o RQ e de 22,10 a 37,25 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ($R^2 = 98,16\%$) para o PAd, diferindo-se significativamente para as doses de 60,0 t ha^{-1} e de 40 e 80,0 t ha^{-1} de PRB, respectivamente. Já para o V%, esses valores médios foram de 60,15 a 73,41 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ($R^2 = 96,30\%$) para o RQ e de 43,31 a 71,92 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ($R^2 = 93,44\%$) para o PAd, com significância para as doses de 15, 30 e 60,0 t ha^{-1} para o RQ e de 20, 40 e 80,0 t ha^{-1} para o PAd. É válido ressaltar que as condições iniciais dos respectivos solos, permitem uma observação coesa dos dados em questão, lembrando que na Tabela 1 pode-se verificar as diferenças nesses teores, em relação ao momento anterior à incubação dos solos com PRB, sendo o V% muito mais baixo no PAd, quando comparado ao RQ.

O efeito positivo, linear e significativo da adição de pó de rocha do basalto (PRB), possibilita sua indicação como remineralizador de solos, uma vez que cumpre com as condições mínimas exigidas, do ponto de vista técnico (composição) e agrônômico, principalmente quando aplicado valores iguais ou superiores a 7,5 t ha^{-1} em solo mais arenosos (como é o caso do RQ) e de 20,0 t ha^{-1} em solos com maior teor de argila (como é o caso do PAd), garantindo um V% mínimo básico para desenvolvimento das culturas agrícolas ($V\% = 55,0 - 60,0 \%$).

Dadas as observações anteriores, temos que o aumento nos macros e microelementos dos solos também foi afetada, em sua maioria, positivamente. Para os macroelementos, os teores de fósforo (P), enxofre (S), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) apresentaram um aumento linear e significativo com o incremento das doses de PRB nos solos, à exceção do S para o PAd e do K para ambos os solos, que apresentaram uma curva de resposta quadrática às doses testadas.

O elemento P teve aumentos lineares e significativos para ambos os solos, sendo que quanto maior a dose de PRB, maiores foram os seus teores médios, variando de 4,29 a 22,48 mg dm^{-3} para o RQ ($R^2 = 88,39\%$) e de 1,98 a 31,47 mg dm^{-3} ($R^2 = 96,23\%$) para o PAd (Figura 4).

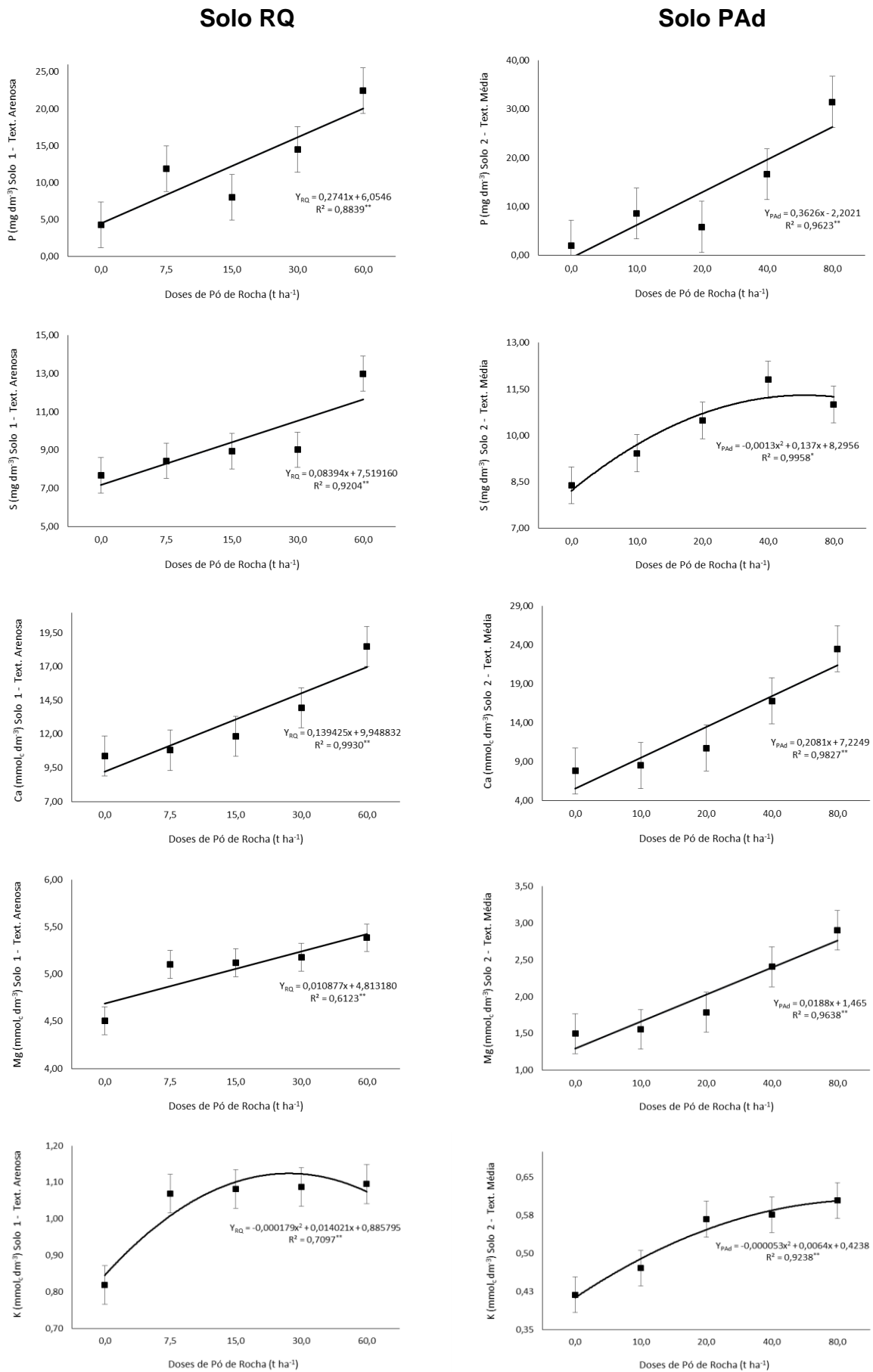


Figura 4 Teores médios de Fósforo – P, Enxofre – S, Cálcio – Ca, Magnésio – Mg e Potássio – K obtidos para o Neossolo Quartzarênico (RQ) e Argissolo Amarelo Distrófico (PAd), após 60 dias de incubação do pó de rocha de basalto (PRB). **, * e NS – Significativo a 1%, 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. UNESP, Jaboticabal-SP, 2020.

Observou aumento nos teores de P (mg dm^{-3}), de 5,2 vezes (80,57%) para o RQ entre as doses de 0,0 a 60,0 t ha^{-1} e de 15,9 vezes (93,85%) para o PAd entre as doses 0,0 e 80,0 t ha^{-1} . Esse fato é outra característica benéfica à produção agrícola, uma vez que contribui para o desenvolvimento inicial das culturas agrícolas, podendo reduzir diretamente os custos de produção com este nutriente, inclusive modificando seus patamares nos solos de baixo à médio e de médio à altos teores. Barrow (2017) relata que os aumentos dos teores de P são decorrentes do aumento do pH (também caracterizado nesta pesquisa) quando dos valores de pH entre de 5,8 e 7,0, uma vez que abaixo o elemento é complexado por ferro e alumínio e acima, por cálcio.

Apesar das baixas quantidades de P, o PRB possibilita uma maior disponibilidade e um melhor aproveitamento do fósforo (P) nos sistemas agrícolas, por meio da liberação do P existente nos solos, em função das alterações físico-químicas que causa.

A presença de fósforo na solução do solo é determinada por sua interação com os íons Fe, Al e Ca e pelo pH, principalmente. Daí, em ambientes mais ácidos, a formação de fosfatos de alumínio, de baixa solubilidade, controlam a presença de P em solução. Já em pH mais elevado, a formação de fosfatos de cálcio, também de baixa solubilidade, passam a controlar P (ERNANI et al. 2000; NOLLA e ANGHINONI, 2006) citado por Nunes (2015). O fato das doses de PRB apresentarem uma correção do pH do solo, fez com que o P (fósforo) ficasse mais disponível na solução do solo e com isso, trazendo benefícios em termos de nutrição de plantas.

Em relação aos teores de enxofre (S), apesar do PRB não fornecer o elemento, uma vez que é pequena sua participação nos constituintes da crosta terrestre, suas alterações, dadas na solução dos solos, permitem a liberação dos sulfatos, sulfetos, compostos orgânicos, dentre outras formas, que tendem a aumentar com a degradação da matéria orgânica (Figura 4). Neste contexto, o uso do PRB, pode auxiliar na disponibilidade desse elemento, de forma indireta, ao interferir no pH, na matéria orgânica do solo e no aumento da atividade total das formas de S na solução do mesmo. Para o RQ houve aumentos de 7,66 para 12,99 mg dm^{-3} do S ($R^2 = 92,04\%$) de forma linear e significativa ($p < 0,01$), e para o PAd os aumentos foram de 8,38 até 11,00 mg dm^{-3} do S ($R^2 = 99,58\%$), de forma quadrática e significativa ($p < 0,05$), com uma dose de máxima resposta dada por 52,69 t ha^{-1} .

Compostos reduzidos de enxofre, principalmente o H_2S , são formados por atividade bacteriana anaeróbica, no processo de oxidação de carbono orgânico a CO_2 e redução de SO_4^{2-} a S^{2-} . Parte deste, ao reagir com íons metálicos é fixado na litosfera, na forma de rochas e sedimentos. Na presença de oxigênio, bactérias aeróbicas também podem produzir S^{2-} , pela decomposição de matéria biológica contendo enxofre (NUNES, 2015). Uma das possíveis respostas para o aumento de enxofre disponível no solo, é que

a incubação do solo com as doses de PRB juntamente com a capacidade de campo à 70%, contribuiu para o desenvolvimento microbiano e estes por sua vez contribuíram para a disponibilidade de S.

Os teores de Ca e Mg também foram alterados de maneira progressiva, com os aumentos das doses de PRB, de forma linear e significativa. Para o Ca, os valores médios foram de 10,36 a 18,47 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ para o RQ e de 7,79 a 23,52 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ para o PAd. Já para os teores médios de magnésio (Mg), os valores aumentaram de 4,5 a 5,38 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ para o RQ e de 1,49 a 2,90 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ para o PAd (Figura 4). À medida que os metais alcalinos entram no solo (bases trocáveis) e são lixiviados, a diminuição do pH ocorre, possibilitando a entrada de H^+ e Al^{3+} no complexo de troca em substituição ao Ca^{2+} e Mg^{2+} em solução. Porém, ao usar o pó de rocha de basalto (PRB), essa condição parece ocorrer em um menor contexto, mantendo constantes os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} disponíveis e, provendo a redução, por exemplo, da acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$), desde que mantido um pH nas faixas de 5,5 e 7,0.

Para os teores de K, também ocorreram aumentos dos teores médios nos dois solos, que apresentavam valores baixos (Tabela 1) deste nutriente antes da instalação dos experimentos e incubação dos solos (RQ e PAd) com pó de rocha (PRB), o que explica os valores baixos a médios mantidos após a incubação, porém com aumentos lineares e significativos, como esperado com uso do PRB. Para o RQ os teores médios do nutriente foram de 0,81 a 1,09 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ e de 0,41 a 0,60 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ para o PAd. Vale ressaltar que esses aumentos proporcionam cerca de 64,00 e de 85,64 kg ha^{-1} de K a mais, entre a testemunha e a dose maior (60,0 t ha^{-1}), respectivamente, representando uma diferença de 21,64 kg ha^{-1} de K para o RQ, indicando como dose de máxima resposta a quantidade de 39,16 t ha^{-1} de PRB. Já quando comparamos os teores médios, em relação ao PAd, esses valores são de 32,73 e 47,22 kg ha^{-1} de K, da testemunha para a maior dose (80,0 t ha^{-1}), respectivamente, computando uma diferença de 14,49 kg ha^{-1} de K, indicando como dose de máxima resposta a quantidade de 60,38 t ha^{-1} de PRB. Para o RQ todas as doses de PRB apresentaram diferenças significativas em relação à testemunha, enquanto para o PAd apenas a dose de 10,0 t ha^{-1} não apresentou diferença significativa em relação a testemunha, demonstrando o real potencial do produto como fonte de K_2O .

Em relação aos teores médios de micronutrientes (silício-Si, boro-B, cobre-Cu, ferro-Fe, manganês-Mn e zinco-Zn) houve decréscimos lineares para o Si e B (Figura 8). No RQ, os teores médios de Si foram de 12,59 para 9,91 mg dm^{-3} , sendo que apenas para as duas maiores doses (30,0 e 60,0 t ha^{-1}) essa diferença foi significativa ($p < 0,01$). Assim, é válido ressaltar que nas doses comerciais para o produto (7,5 e 15,0 t ha^{-1}) não houveram efeitos ($p < 0,01$). Para o PAd esses valores foram de 7,61 para 6,64 mg dm^{-3} ,

mas sem apresentar diferenças significativas entre as doses propostas e testemunha. Desta forma, é interessante considerar a ação do Si para cada tipo de solo, sendo que quanto maior os teores de argila nos mesmos, menor a possibilidade de diminuição nos teores de Si, demonstrando que quanto menor a fertilidade do solo, maior é a atuação do Si. Os teores de Si em decréscimos demonstram as possíveis atividades deste elemento no solo, possibilitando a disponibilidade maior de outros elementos, por meio dos aumentos na soma de bases (SB) e na capacidade de troca catiônica (CTC).

Os teores médios de B apresentaram uma redução linear e significativa estatisticamente, para os solos testados, mas com amplitude baixa, sendo que para o RQ a testemunha obteve valor médio de $0,17 \text{ mg dm}^{-3}$ e a maior dose ($60,0 \text{ t ha}^{-1}$) de $0,15 \text{ mg dm}^{-3}$ e para o PAd os valores foram de $0,20$ para $0,16 \text{ mg dm}^{-3}$ ($80,0 \text{ t ha}^{-1}$), respectivamente.

Para os demais microelementos, ocorreram aumentos lineares e significativos, com exceção do Fe e Mn, para o RQ, cujo efeito foi quadrático. Desta forma, podemos destacar que o uso de PRB disponibiliza os principais micronutrientes envolvidos em reações enzimáticas e isoenzimáticas nas plantas e, que o aumento é devido ao uso do produto e as novas condições que se cria nos solos. Com isso, os aumentos nos teores de Cu proporcionaram cerca de $3,81 \text{ kg ha}^{-1}$, onde a testemunha apresentou valor médio de $0,35 \text{ mg dm}^{-3}$ e a maior dose $0,41 \text{ mg dm}^{-3}$ para o RQ ($60,0 \text{ t ha}^{-1}$). Para o PAd, esse aumento proporcionou cerca de $12,56 \text{ kg ha}^{-1}$ de Cu, segundo os valores médios obtidos da testemunha com $0,34 \text{ mg dm}^{-3}$ e a maior dose com $0,53 \text{ mg dm}^{-3}$ ($80,0 \text{ t ha}^{-1}$), conforme Figura 5.

Os teores de Fe aumentaram de forma semelhante para os dois solos. No RQ os valores médios foram de $3,29$ a $4,51 \text{ mg dm}^{-3}$, permitindo uma curva de resposta quadrática, com ponto de máxima atingindo a dose de $40,94 \text{ t ha}^{-1}$ ($4,76 \text{ mg dm}^{-3}$ de Fe) e para o PAd foram de $3,98$ a $5,68 \text{ mg dm}^{-3}$, de forma linear (Figura 6). Apesar da aplicação do PRB, os teores de Fe se mantiveram na faixa de baixo a médio teor para os solos utilizados. Desta forma, nota-se um comportamento diferente deste nutriente nos solos, uma vez que as doses podem disponibilizá-lo de maneira diferente, sendo que para o solo com maior teor de argila (PAd), haverá necessidade de mais produto. Porém, esta observação não deve ser vista de forma isolada e nem ser um ponto de decisão para uso ou não do produto ou como indicativo de doses, devendo apenas ser dada atenção para o comportamento em questão, nos referidos solos, inclusive em função dos seus teores iniciais do referido nutriente.

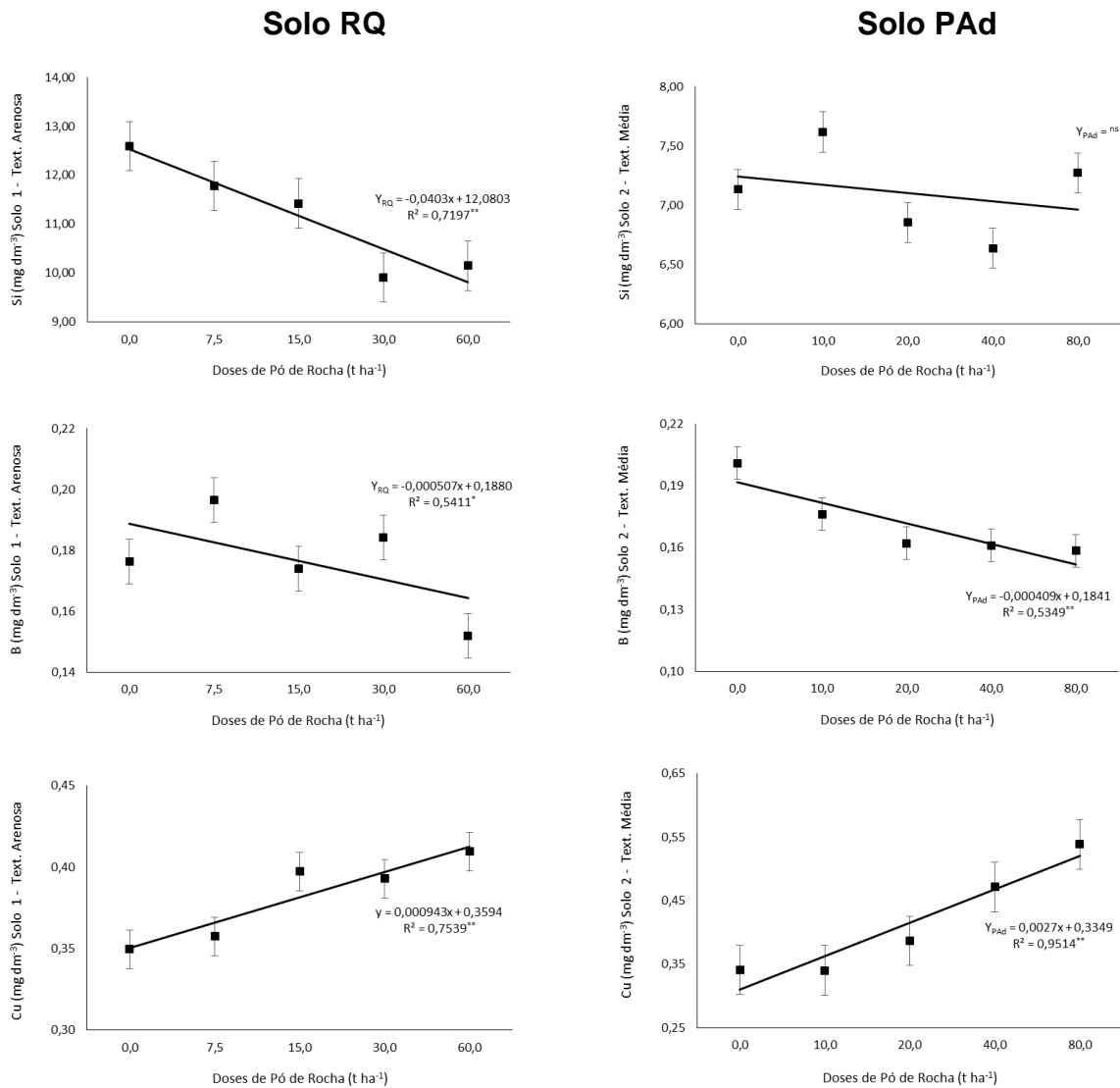


Figura 5. Teores médios de Silício – Si, Boro – B, Cobre – Cu obtidos para o Neossolo Quartzarênico (RQ) e Argissolo Amarelo Distrófico (PAd), após 60 dias de incubação do pó de rocha de basalto (PRB). **, * e NS – Significativo a 1%, 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. UNESP, Jaboticabal-SP, 2020.

Para o Mn, no RQ os teores médios foram de 1,33 a 2,12 mg dm⁻³, com uma curva de resposta quadrática e ponto de máxima estimado em 44,17 t ha⁻¹ de PRB, para o teor de 2,22 mg dm⁻³ de Mn e, para o PAd variaram de 0,31 a 0,89 mg dm⁻³ de forma linear (Figura 6). É válido ressaltar que os teores dos óxidos de manganês são baixos nos solos brasileiros, porém tem importante característica nas propriedades químicas dos mesmos, tratando-se de um elemento essencial às plantas e seres humanos. Por essas condições, vale ressaltar para o Fe e o Mn, que suas formas oxidadas estão associadas a nódulos em que predominam silicatos (quartzo, argilominerais) os quais provavelmente atuam como agentes nucleadores para a oxidação e precipitação do Mn e do Fe (SCHWERTMANN e FANNING, 1976).

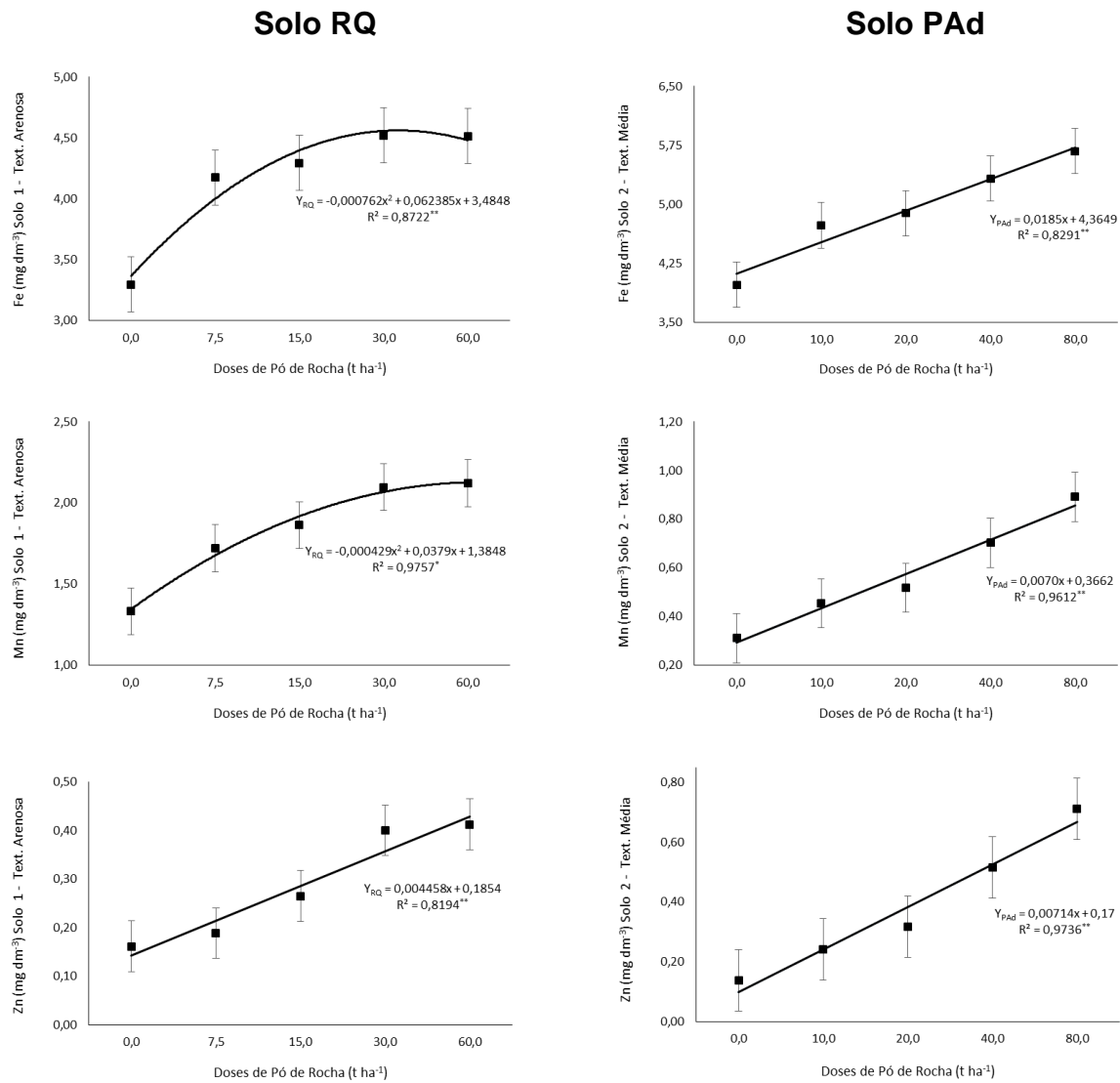


Figura 6. Teores médios de Ferro – Fe, Manganês – Mn e Zinco – Zn obtidos para o Neossolo Quartzarênico (RQ) e Argissolo Amarelo Distrófico (PAd), após 60 dias de incubação do pó de rocha de basalto (PRB). **, * e NS – Significativo a 1%, 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. UNESP, Jaboticabal-SP, 2020.

Em relação aos teores médios de Zn, para o RQ, as variações atingiram níveis baixos a médios para o solo em questão, variando de 0,16 a 0,41 mg dm⁻³ (Figura 6), proporcionando aumento de 16,43 kg ha⁻¹ de Zn (de 0,0 para 60,0 t ha⁻¹) com uso do PRB. Para o PAd, em que todas as doses do PRB foram significativas para os níveis de Zn, com a adição das duas maiores doses (40 e 80,0 t ha⁻¹) saiu-se do nível baixo-médio para o nível médio-alto, de acordo com Raij et al. (1996), com os teores médios variando de 0,14 a 0,71 mg dm⁻³, proporcionando aumento de 37,50 kg ha⁻¹ de Zn (de 0,0 para 80,0 t ha⁻¹). Vale ressaltar que na Tabela 1 os valores eram baixos deste nutriente, antes da incubação e, sendo assim, os incrementos devem-se ao uso do pó de rocha (PRB).

Dessa maneira, mediante os dados observados, após processo de incubação dos solos RQ e PAd com PRB e das análises químicas dos mesmos, nota-se a eficiência do produto em relação aos atributos dos solos, para contemplar o bom desenvolvimento agrônomo de plantas, melhorando seu ambiente de desenvolvimento e suporte, sem a

adição de produtos que possam poluir ou mesmo causar a salinização desses, mediante as culturas alvos, as particularidades da produção e contemplando uma forma de cultivo sustentável, já que é um produto de origem regional e natural.

Segundo Malavolta (2006), a disponibilidade de nutrientes é influenciada pela acidez do solo (Figura 7), uma vez que a solubilidade dos compostos minerais e a capacidade de troca de cátions do solo (CTC) estão diretamente relacionadas à atividade hidrogeniônica. A limitação ao desenvolvimento das plantas decorre, principalmente, dos efeitos indiretos do pH, como o aumento da disponibilidade de alumínio e de manganês a níveis tóxicos ou a indução de deficiências de Ca, Mg, P, Fe, Cu e Zn, que prevalecem sobre os efeitos diretos do H^+ (MARSCHNER, 1995).

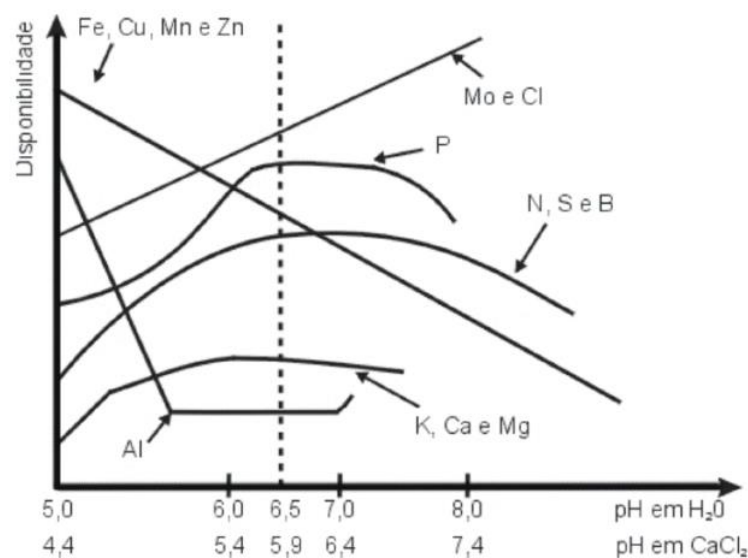


Figura 7. Relação entre pH e a disponibilidade dos elementos no solo. Malavolta (2006).

O PRB contribuiu para a correção do pH dos dois solos testados, como um efeito sinérgico à prática de correção de solos, sendo que esses antes da incubação apresentavam um pH mais ácido do que após a sua realização, fato importante para o desenvolvimento e crescimento inicial das culturas agrícolas, uma vez que essa contribuição está diretamente relacionado com o aumento da disponibilidade de macro e micronutrientes no solo.

6.3 Avaliação agrônômica para a cultura do milho

Após o período de 60 dias de incubação dos solos foi semeado milho em 40 vasos, sendo 20 vasos com o Neossolo Quartzarênico (RQ) e 20 vasos com o Argissolo Amarelo Distrófico (PAd), com adição das cinco doses de pó de rocha de basalto (PRB), para cada um deles. As plantas obtidas foram avaliadas por meio das características agrônômicas da cultura, aos 60 dias após a emergência das plântulas. Para a altura de planta (AP), no

RQ o efeito do pó de rocha de basalto (PRB) não apresentou diferenças significativas, porém houve um aumento linear para AP entre as doses de PRB em relação à testemunha. O mesmo foi observado para o PAd, em relação à AP (Tabela 05).

O diâmetro de colmo (DC), quando analisado para o RQ apresentou diferença significativa apenas para a dose de 30,0 t ha⁻¹ em relação às demais doses, atingindo seu ponto de máxima com uso de 37,88 t ha⁻¹ e um diâmetro médio de 10,24 mm, com um efeito quadrático. Para o PAd, no DC não foram observadas diferenças significativas entre as doses proposta e a testemunha, entretanto houve aumento linear nos valores médios desta característica, em função das doses testadas, com um DC igual a 9,51 mm para a dose de 80 t ha⁻¹ (Tabela 05).

Para a avaliação do índice de área foliar estimado (IAFE), o comportamento desta característica agrônômica para os dois solos foi semelhante, apresentando um efeito quadrático. No RQ a dose de 30,0 t ha⁻¹ proporcionou maior valor médio significativo e diferente estatisticamente da testemunha, sendo semelhante ao valor médio apresentado pela dose máxima de 60,0 t ha⁻¹, que por sua vez não se diferiu das demais doses e da testemunha. Para o PAd a dose de 20,0 t ha⁻¹ proporcionou maior valor médio significativo e diferente estatisticamente da testemunha, mas não apresentou essa diferença entre as doses propostas, as quais não apresentaram valores médios diferentes e significativos em relação à testemunha. Ressalta-se para o IAFE, os valores médios para os pontos de máximas doses foram de 37,82 t ha⁻¹ no RQ e de 40,76 t ha⁻¹ no PAd, com 158,26 e 174,68 cm² planta, respectivamente (Tabela 05).

Em relação ao teor de clorofila (TC), medidos por meio do clorofilômetro e determinado utilizando-se a última folha desenvolvida, o comportamento foi distinto para os solos testados, em função de cada dose proposta. Para o RQ, os valores médios não diferiram entre si significativamente, entre as doses e a testemunha, mas apresentaram um desempenho linear, em função das doses propostas. No PAd, os valores médios apresentaram um efeito quadrático, com destaque para a dose de 48,96 t ha⁻¹ como ponto de máxima, obtendo um TC de 30,09 (Tabela 05).

A massa de matéria seca da parte aérea (MS), para o RQ foram observadas diferenças significativas entre a dose de 30,0 t ha⁻¹ em relação aos demais tratamentos, à exceção da dose de 60,0 t ha⁻¹. Porém, o maior valor médio foi dado para a dose de 45,33 t ha⁻¹, com 5,57 g planta⁻¹, com incrementos de 6,28 a 42,44% da testemunha para as doses de PRB. Já para o PAd, as doses de 10,0, 40,0 e 80,0 t ha⁻¹ apresentaram os maiores valores médios em relação à testemunha, mas apenas a dose de 20,0 t ha⁻¹ diferiu-se significativamente dela. Para o referido solo, nas condições testadas, o ponto de máxima dose foi de 48,42 t ha⁻¹, com 6,83 g planta⁻¹, com incrementos de 18,34 a 38,37% da testemunha para as doses de PRB (Tabela 05).

Tabela 5. Altura de planta (AP), diâmetro de colmo (DC), índice de área foliar estimado (IAFE), teor de clorofila (TC) e massa seca da parte aérea (MS) de plantas de milho cultivadas com doses de pó de rocha de basalto Baú (PRB), em Neossolo Quartzarênico (RQ) e Argissolo Amarelo distrófico (PAd), aos 60 dias após emergência. UNESP, 2021.

M		Solo - RQ			
PRB (t ha⁻¹)	AP (cm)	DC (mm)	IAFE (cm²)	TC	MS (g)
0,0	24,87	7,16b	122,32b	22,50	3,58b
7,5	25,05	7,68b	123,85b	23,60	3,82b
15,0	25,45	7,97b	129,98b	23,95	3,19b
30,0	28,27	10,89a	167,98a	26,27	6,22a
60,0	29,75	8,85b	140,78ab	25,87	5,10ab
Média	26,68	8,51	136,98	24,44	4,38
F	1,65 ^{ns}	10,96 ^{**}	5,24 [*]	2,92 ^{ns}	8,33 ^{**}
CV (%)	12,84	10,39	11,98	7,63	19,79
Variável	Equação				R² (%)
AP	$Y_{AP} = 0,0895x + 24,67$				92,92 [*]
DC	$Y_{DC} = -0,0025x^2 + 0,1894x + 6,65$				77,54 ^{**}
IAFE	$Y_{IAFE} = -0,031x^2 + 2,345x + 113,91$				72,18 [*]
TC	$Y_{TC} = 0,0567x + 23,16$				71,28 [*]
MS	$Y_{MS} = -0,0012x^2 + 0,1088x + 3,10$				55,87 [*]
Tratamentos		Solo - PAd			
PRB (t ha⁻¹)	AP (cm)	DC (mm)	IAFE (cm²)	TC	MS (g)
0,0	25,02	8,47	105,98b	23,95	4,32b
10,0	25,82	8,56	154,95ab	25,75	5,29ab
20,0	25,90	9,32	206,63a	30,32	7,01a
40,0	26,92	9,42	141,70ab	28,50	6,09ab
80,0	27,35	9,51	136,10ab	27,92	5,98ab
Média	26,20	9,06	149,07	27,29	5,74
F	1,06 ^{ns}	1,54 ^{ns}	5,07 [*]	2,88 ^{ns}	4,87 [*]
CV (%)	6,87	8,84	21,95	10,70	15,77
Variável	Equação				R² (%)
AP	$Y_{AP} = 0,028x + 25,38$				88,24 ^{ns}
DC	$Y_{DC} = 0,013x + 8,68$				65,83 [*]
IAFE	$Y_{IAFE} = -0,0303x^2 + 2,47x + 126,50$				34,19 [*]
TC	$Y_{TC} = -0,0024x^2 + 0,235x + 24,34$				68,88 [*]
MS	$Y_{MS} = -0,00095x^2 + 0,0092x + 4,60$				63,79 [*]

¹Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferente entre si pelo Teste de Tukey, a 5% de probabilidade; *, ** e ^{ns} – Significativo a 1%, 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

Quando se compara com as fotos dos tratamentos, podemos observar esses efeitos agrônômicos, conforme Figura 8.



Figura 8. Comparação entre tratamentos T1: testemunha, T2: 7,5 t ha⁻¹, T3: 15,0 t ha⁻¹, T4: 30,0 t ha⁻¹, e T5: 60,0 t ha⁻¹ aos 15 (A) e 60 (B) dias após a emergência, para a cultura do milho, no solo arenoso - RQ. UNESP, Jaboticabal-SP, 2021.

Quando se compara com as fotos dos tratamentos, podemos observar esses efeitos agrônômicos, conforme Figura 9.

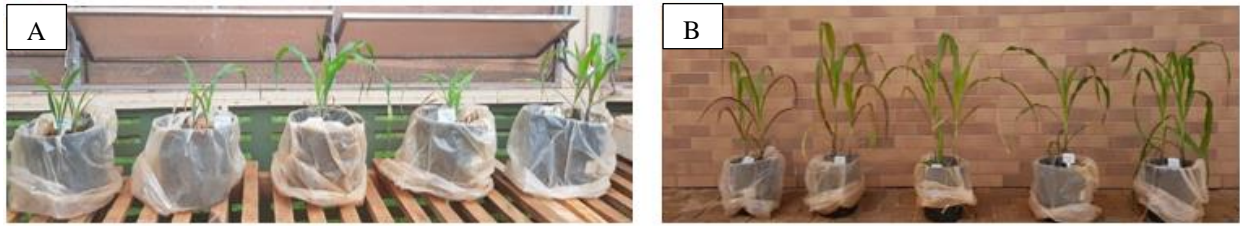


Figura 9. Comparação entre tratamentos T1: testemunha, T2: 10,0 t ha⁻¹, T3: 20,0 t ha⁻¹, T4: 40,0 t ha⁻¹, e T5: 80,0 t ha⁻¹ aos 15 (A) e 60 (B) dias após a emergência, para a cultura do milho, no solo de textura média - PAd. UNESP, Jaboticabal-SP, 2021.

O uso de agrominerais tem demonstrado efeitos positivos sobre o crescimento, produção e nutrição de plantas (SILVA et al., 2012; SILVA et al., 2013). Em experimentos com pastagem, foi observado incrementos na matéria seca na ordem de 63, 76, 55 e 101%, respectivamente, para as doses de 1.000, 2.000, 4.000 e 8.000 kg ha⁻¹ de pó de basalto hidrotermalizado, em relação ao tratamento controle (DALACORTE et al., 2015). Almeida Junior et al. (2019) observaram maiores produtividades na cultura do milho em função do aumento das doses do remineralizador de solo.

Tal fato também pode ser observado na condição desta pesquisa, com o PRB para os componentes agrônômicos da cultura do milho, avaliados após 60 dias de emergência das plântulas.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio dos dados observados na primeira etapa deste estudo agrônômico, referente ao processo de incubação dos solos Neossolo Quartzarênico – RQ (textura arenosa) e Argissolo amarelo distrófico – PAd (textura média), com o uso do pó de rocha de basáltica (PRB), houve uma ação eficiente do produto nas alterações químicas dos solos, possibilitando:

- Aumentos nos valores de pH e diminuição da acidez potencial (H+Al);
- Aumentos na Soma de Bases (SB), Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Saturação das Bases (V%);
- Diminuição dos teores de Alumínio Tóxico e da Saturação por Alumínio (m%);
- Aumentos nos teores de Macro e Micronutrientes: fósforo (P), enxofre (S), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn);
- Os teores de silício (Si) apresentaram diminuição dos valores médios para o RQ, com efeito significativo para as doses de 30 e 60,0 t ha⁻¹ e sem efeitos significativos para o PAd, apesar de também diminuir. Os teores de boro (B) também foram diminuídos com o aumento das doses de PRB.

Além de levantar uma hipótese de que o PRB pode criar um ambiente favorável aos microrganismos, uma vez que no experimento, ao adicionar o PRB e este por sua vez corrigir o pH, juntamente com o solo na capacidade de campo à 70% e mantendo as trocas gasosas, criou-se um ambiente favorável aos microrganismos no solo. E isso ficou evidenciado na disponibilidade de enxofre, nutriente este que não é fornecido pelo PRB, e sim disponibilizado através de atividades bacterianas.

Na segunda etapa desse estudo agrônomo, referente às avaliações das características agrônomicas das plantas, foi observado acréscimos nos valores médios de massa de matéria seca (MS) em ambos os solos para a cultura, dos experimentos realizados com o uso do pó de rocha de basalto (PRB) nas doses testadas, confirmando o potencial do produto no desenvolvimento e crescimento dessa cultura, como uma fonte nutricional.

8. CONCLUSÃO

Conclui-se que o PRB apresentou eficiência agrônômica efetiva, nas doses e solos testados, em relação aos atributos químicos e mineralógicos da rocha basáltica utilizada, contribuindo para atributos químicos dos solos, aumentando a disponibilidade de macro e micronutrientes, aumentando os valores médios observados de massa de matéria seca para a cultura do milho e, atendendo aos critérios definidos pelo MAPA para ser registrado e utilizado como remineralizador de solo.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRANTES JÚNIOR, F. R.; NOGUEIRA, A.C.R. (2013). Reconstituição paleoambiental das formações Motuca e Sambaíba, Permo-Triássico da Bacia do Parnaíba no sudoeste do Estado do Maranhão, Brasil. *Geologia USP. Série Científica*, 13(3), 65–82.

ALMEIDA JUNIOR, J. J.; SMILJANIC, K. B. A.; MATOS, F. S. A; DA SILVA, A. R.; ARAÚJO, S. L., & GOMES, J. P. S. Análise das variáveis tecnológicas do milho em função das doses crescentes de condicionador pó de rocha. In: Anais Colóquio Estadual de Pesquisa Multidisciplinar (ISSN-2527-2500) & Congresso Nacional de Pesquisa Multidisciplinar, 2019. Disponível em: <<https://publicacoes.unifimes.edu.br/index.php/coloquio>>, acessado em 25/04/2021.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS – ANDA. **Pesquisa setorial: Macro indicadores.** Disponível em: <http://anda.org.br/wp-content/uploads/2020/07/Principais_Indicadores__2020.pdf>. Acesso em jul. 2020.

BARRÓN, V.; MÉNDEZ, J.M.; BALBUENA, J.; CRUZ-YUSTA, M.; SÁNCHEZ, L.; GIMÉNEZ, C.; SACRISTÁN, D.; GONZÁLEZ-GUZMÁN, A.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, ANTONIO R.; SKIBA, U.M.; INDA, A.V.; MARQUES Jr., J.; RECIO, J.M.; DELGADO, A.;

- Campillo, M.C.; Torrent, J. (2020). Photochemical emission and fixation of NOX gases in soils. **Science of the Total Environment**, 702, 134982.
- BARROW, N.J. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. **Plant Soil**. 410:401-410. 2017. DOI 10.1007/s11104-016-3008-9.
- BEERLING, D.J., LEAKE, J.R., LONG, S.P., SCHOLES, J.D., TON, J., NELSON, P.N., BIRD, M., KANTZAS, E., TAYLOR, L., Sarkar, B., Kelland, M., DeLucia, E., Kantola, I., Müller, C., Rau, G., Hansen, J., 2018. Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. **Native Plants** 1, 138e147. <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0108-y>.
- BLUM W.E.H.; HERBINGER, B.; MENTLER, A.; OTTNER, F.; POLLAK, M.; UNGER, E.; WENZEL, W.W. 1989a. Zur Verwendung von Gesteinsmehlen in der Landwirtschaft. I. Chemisch-mineralogische Zusammensetzung und Eignung von Gesteinsmehlen als Düngemittel. **Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde**, 152: 421–425.
- BLUM, W.E.H.; HERBINGER, B.; MENTLER, A.; OTTNER, F.; POLLAK, M.; UNGER, E.; WENZEL, W.W. 1989b. Zur Verwendung von Gesteinsmehlen in der Landwirtschaft. II. Wirkung von Gesteinsmehlen als Bodenverbesserungsmittel. **Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde**, 152: 427–430.
- BORGHI, E.; PEREIRA FILHO, I. A.; RESENDE, A. V. de; SILVA, D. D. da; MENDES, S. M.; SILVA, A. F. da. **Dez dicas para produção de milho**. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, 33 p : il. -- (Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1518-4277; 216), 2017.
- 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. <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=317444>>
- CARVALHO, A.M.X., DELIBERALI, D.C., CARDOSO, I.M. Efeito da rochagem no crescimento e nutrição de plantas de soja sob manejo agroecológico. In: Congresso Brasileiro de Rochagem, 2009. In: **Anais...** Brasília, D.F., 2009. Embrapa, p.183-189.
- COELHO, A.M. **Nutrição e adubação do milho**. In: EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 2006. 10 p. (EMBRAPA-CNPMS. Circular Técnica, 78).
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2021/22 (2022). Disponível em:<<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 04 ago 2022.
- CUADROS, J. (2017). Clay minerals interaction with microorganisms: a review. **Clay Minerals**, 52(2), 235–262.
- DALACORTE, L., KORCHAGIN, J., ABREU, C. T., TONINI, V., MULLER, R., & BORTOLUZZI, E. C. Componentes da acidez do solo e produção de pastagem em campo

nativo submetido à aplicação de pó-de-basalto hidrotermalizado. In: **XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Natal-RN. 2015.

DALMORA, A.C., RAMOS, C.G., QUEROL, X., KAUTZMANN, R.M., OLIVEIRA, M.L., TAFFAREL, S.R., MORENO, T., SILVA, L.F.O., 2016. Nanoparticulate mineral matter from basalt dust wastes. **Chemosphere** **144**, 2013e2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.10.047>, 2016.

DALMORA, A.C.; RAMOS, C.G.; OLIVEIRA, M.L.S.; OLIVEIRA, L.F.S.; SCHNEIDER, I.A.H.; KAUTZMANN, R.M. **Journal of Cleaner Production** **256** (2020a) 120432.

DALMORA, A.C.; RAMOS, C.G.; PLATA, L.G.; COSTA, M.L.; KAUTZMANN, R.M.; OLIVEIRA, L.F.S. **Science of the Total Environment** **710** (2020b) 136240.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solos**. DONAGEMMA, G.K. et al. – Dados eletrônicos – Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Documentos / Embrapa Solos, ISSN 1517-2627;132).

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. SANTOS, H. G. et al. (Coord.) 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

FAQUIN, V.; VALE, F.R.; FURTINI NETO, A.E. **Cultivo de plantas em ambiente controlado**: solução nutritiva, hidropônico e em vasos com solo. DCS/UFLA, Lavras, 2000. 15p.

FALKER AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA LTDA. **Manual do medidor eletrônico de clorofila ClorofiLOG CFL 1030**, Porto Alegre, 2008. 4p.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The state of food security and nutrition in the world 2019**. Home, Disponível em: <<http://www.fao.org/3/ca5162en/ca5162en.pdf>>. Acesso em jul, 2020.

FERREIRA, Daniel Furtado. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, [S.l.], v. 37, n. 4, p. 529-535, dec. 2019. ISSN 1983-0823. Available at: <<http://www.biometria.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/450>>. Date accessed: 13 may 2020.

FRÁGUAS, J. C.; SILVA, D. J. Nutrição e adubação da videira em regiões tropicais. **Informe agropecuário**, Belo Horizonte, v.19, n.197, p.70-75, 1998.

GILLMAN, G.P. 1980. The effect of crushed basalt scoria on the cation exchange properties of highly weathered soil. **Soil Science Society of American Journal**, 44: 465-468.

GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, J.; FERRAZ, S.F.B.; LIMA BRANCALION, P.H.S.; HUBNER, A.W.P.; BOUILLET, J.P.D.; LACLAU, J.P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **For. Ecol. Manag.** **301**, 6e27. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>.

Görgen, C. A. **Paragênese Mineral E Atributos Físico-Químicos De Solos Originados De Diferentes Litologias E Características Da Rizosfera Desenvolvida Com Rochas Remineralizadoras: Contribuição Para O Manejo Da Fertilidade Na Região Do Sudoeste Goiano**. 43. ed. Brasília - Df: Universidade de Brasília; 2018. 196 p.

- GREGGER, M., KABIR, A.H.; LANDBERG, T.; MAITY, P.J.; LINDBERG, S. Silicate reduces cadmium uptake into cells of wheat. **Environ. Pollut.** 211, 90e97, 2016.
- GUDBRANDSSON, S.; WOLFF-BOENISCH, D.; GISLASON, S.R.; OELKERS, E.H. 2011. An experimental study of crystalline basalt dissolution from 2 to 11 pH and temperatures from 5 to 75 °C. **Geochim. Cosmochim. Acta** 75, 5496–5509.
- HANGX, S. J. T.; SPIERS, C. J. (2009), Coastal spreading of olivine to control atmospheric CO₂ concentrations: A critical analysis of viability, **Int. J. Greenhouse Gas Control**, 3(6), 757-767, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.07.001>
- HILDEBRAND, E.E.; SCHACK-KIRCHNER, H. 2000. Initial effects of lime and rock powder application on soil solution chemistry in a dystic cambisol results of model experiments. **Nutrien Cycling in Agroecosystems**, 56:69–78.
- KNAPIK, J.G. **Utilização do pó de basalto como alternativa à adubação convencional na produção de mudas de *Mimosa scabrella* BENTH e *Prunus sellowii* KOEHNE.** Curitiba, 2005. 163 f. Dissertação (Pós-graduação) – Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba.
- KÖNIG, U.; PÖLLMAN, H.; ANGÉLICA, R. S. **O Refinamento de Rietveld como um método para o controle de qualidade de minérios de ferro.** Belém, 2002, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências.
- KORCHAGIN, J.; CANER, L.; BORTOLUZZI, E.C.; 2019. Variability of amethyst mining waste: a mineralogical and geochemical approach to evaluate the potential use in agriculture. **J. Clean. Prod.** 210, 749e758. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.039>.
- MACHADO, F. B. et al. **Enciclopédia multimídia de minerais em Atlas de rochas.** 2003. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/museudpm/>. Acesso em: 10 mai. 2020.
- MACHADO, R.V.; ANDRADE, F.V.; PASSOS, R.R.; RIBEIRO, R.C.D.C.; MENDONÇA, E.S.; MESQUITA, L.F. Characterization of ornamental rock residue and potassium liberation via organic acid application. **Rev. Bras. Ciência do Solo** 40, 1e13, 2016.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações.** 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas.** Piracicaba: Ceres, 2006.631p.
- MANNING, D. A. C.; THEODORO, S. H. (2018). Enabling food security through use of local rocks and minerals. **Extractive Industries and Society**.
- MARTINS, É. S.; SILVEIRA, C. A. P.; BAMBERG, A. L.; MARTINAZZO, R.; BERGMANN, M.; ANGÉLICA, R. S. Silicate agrominerals as nutrient sources and as soil conditioners for tropical agriculture. In: **World Fertilizer Congress**, v. 16, p. 138, 2014.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants.** London: Academic Press, 1995. 888 p.
- MELO, V. F.; CÁTIA, S.; UCHÔA, P.; DIAS, F. D. O. (2012). Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima, **Acta Amazonica**, 42(4), 471–476.
- Nunes, R. R.; Rezende, M. O. O. **Recurso Solo: Propriedades e Usos.** São Carlos: Ed. Cubo; 2015. 808 p.

- Moreira, A; Bernardi, A; Rassini, J. Correção do Solo. (2008) **Estado Nutricional e Adubação da Alfafa**. São Paulo: Embrapa pecuária sudeste; 45 p.
- PÁDUA, E. J. **Rochagem como adubação complementar para culturas oleaginosas**. Dissertação (mestrado) 2012. – Universidade Federal de Lavras (UFLA), 91 pág., 2012.
- PEREIRA, C.N.; PORCIONATO, G.L.; CASTRO, C.N. (2018). Aspectos socioeconômicos da região do Matopiba. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, IPEA, 18, 47–59.
- RAIJ, B. van; ANDRANDE, J. C.; CANTARELLA, H.; GUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. 1.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. Milho para grãos e silagens. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico & Fundação IAC, 1996. p.56-59 (boletim Técnico, 100).
- RAMOS, C.G., MELLO, A.G., KAUTZMANN, R.M., 2014. **A preliminary study of volcanic rocks for stonemeal application**. ENMM 1–2, 30–35.
- RAMOS, C.G.; QUEROL, X.; DALMORA, A.C. PIRES, K.C.J.; SCHNEIDER, I.A.H.; SILVA, L.; KAUTZMANN, R.M. Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer. **Journal of Cleaner Production** **142**, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.006
- RESENDE, A.V.; MARTINS, E.S.; OLIVEIRA, C.G.; SENA, M.C.; MACHADO, C.T.T.; KINPARA, D.I.; OLIVEIRA FILHO, E.C. Suprimento de potássio e pesquisa de uso de rochas in natura na agricultura brasileira. *Espaço Geogr.* 2006; 9:19-42.
- RESENDE, M. et al. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. Viçosa, 2002. 338 p.
- SANTOS, M.E.C.M.; CARVALHO, M.S.S. (2009). Paleontologia das Bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís – Reconstituições paleobiológicas. Rio de Janeiro: CPRM, 211 p.
- SCHUILING, R.D., KRIJGSMAN, P. Enhanced Weathering: An Effective and Cheap Tool to Sequester CO₂. **Climatic Change** **74**, 349–354 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10584-005-3485-y>.
- SCHWERTMANN, U. FANNING, D.S. Iron-manganese concretions in hydrosequences of soils in loess in Bavaria. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40:731-738, 1976.
- SILLANPÄÄ, M. (1972). Trace elements in soils and agriculture (Swedish In). **Rome**: Food and Agriculture Organization, Land and Water Development Division.
- SILVA, A.; ALMEIDA, J. A.; SCHMITT, C.; COELHO, C. M. M. Avaliação dos efeitos da aplicação de basalto moído na fertilidade do solo e nutrição de *Eucalyptus benthamii*. **Revista Floresta**. Curitiba, PR, v. 42, n. 1, p. 69 - 76, jan./mar. 2012.
- SILVA, A.G.; ALMEIDA, C.N.; VALENTE, S.C.; ALMEIDA, L.F.B. (2017). The petrogenesis of tholeiitic diabases in eastern Parnaíba Basin: evidence for geochemical heterogeneities in the subcontinental lithospheric mantle in NE Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, 47(1), 109–126. <<https://doi.org/10.1590/2317-4889201720160041>>
- SILVA, M.H.M.; SANTOS, C.C.; SANTANA, A.P.; ALVES, J.M. Uso da rochagem como fonte alternativa de nutrientes na produção de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*)

para a indústria de etanol. **Anais...**, XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Florianópolis, SC. 2013. _p.

SOUZA, F. N. S., OLIVEIRA, C. G., MARTINS, É. S., & ALVES, J. M. Efeitos condicionador e nutricional de um remineralizador de solos obtido de resíduos de mineração. **Agri-Environmental Sciences**, v. 3, n. 1, p. 1-14, 2017.

SONG, S.K., HUANG, P.M. Dynamics of potassium release from potassiumbearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 52, 1988. 383e390.

TAVARES, L. F.; CARVALHO, A. M. X.; CAMARGO, L. G. B.; PEREIRA, S. G. F.; CARDOSO, I. M. Nutrients release from powder phonolite mediated by bioweathering actions. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture** (2018) 7:89–98 <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0194-x>.

THEODORO, S. H. (2000). **A Fertilização da Terra pela Terra: Uma Alternativa de Sustentabilidade para o Pequeno Produtor Rural**. Ph.D. Thesis, University of Brasilia, 231 p.

THEODORO, S.H.; MARTINS, E.S. **Anais do I Congresso Brasileiro de Rochagem**. Embrapa Cerrados. Brasília, DF. 2010. 322p.

THEODORO, S.H.; MARTINS, E.S.; FERNANDES, M.M.; CARVALHO, A.M.X. **Anais do II Congresso Brasileiro de Rochagem**. Visconde do Rio Branco: Suprema. Poços de Caldas, MG. 2013. 399p.

VAN NOORT, R.; MORKVED, P.T.; DUNDAS, S.H. Acid Neutralization by Mining Waste Dissolution under Conditions Relevant for Agricultural Applications. **Geosciences** 2018, 8, 380; doi:10.3390/geosciences8100380.

VAN STRAATEN, P. (2007). *Agrogeology: The use of rocks for crops* (1st ed.). Cambridge, Ontario CA: **Enviroquest Ltd.**

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

VAN STRAATEN, P. **Rocks for Crops: Agrominerals of sub-Saharan Africa**. ICRAF, Nairobi, Kenya, 338pp, 2002.

VON FRAGSTEIN, P.; PER t I, W.; VOGTMANN, H. 1988. Verwitterungsverhalten silikatischer Gesteinsmehle unter Laborbedingungen. **Zeitschrift für Pflanzenern.hrung und Bodenkunde**, 151:141–146.

VON PINHO, R. G.; BORGES, I. D.; PEREIRA, J. L. D. A. R.; REIS, M. C. D. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.8, n.2, 2009.

WEST, P. C., GERBER, J. S., ENGSTROM, P. M., MUELLER, N. D., BRAUMAN, K. A., CARLSON, K. M., CASSIDY, E. S., JOHNSTON, M., MACDONALD, G. K., RAY, D. K., & SIEBERT, S. (2014). Leverage points for improving global food security and the environment. **Science**, **345** (6194), 325–328.

WILSON, M. J. (2004). Weathering of the primary rock-forming minerals: processes, products and rates. **Clay Minerals**, 39(3), 233–266.