

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Pó de diabásio e disponibilidade do fósforo no solo

Monica Liliana Fuentes Beltran

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2023

Monica Liliana Fuentes Beltran
Engenheira Agrônoma

Pó de diabásio e disponibilidade do fósforo no solo
versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **ANTONIO CARLOS DE AZEVEDO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Fuentes Beltran, Monica Liliana

Pó de diabásio e disponibilidade do fósforo no solo / Monica Liliana Fuentes Beltran. -- versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2023.

79 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Pó de rocha 2. Fósforo disponível 3. Fracionamento de fósforo 4. Suscetibilidade magnética I. Título

DEDICATÓRIA

*A meus pais, Victoria e Humberto, meus irmãos,
minha filha Clara e meu esposo Rafael,
que em todo momento foram minha fortaleza
para atingir este novo objetivo
proposto na minha vida*

Com Amor,

Monica.

AGRADECIMENTOS

Obrigada, meu senhor, por mais uma bênção em minha vida e por guiar meus passos até aqui.

Aos meus pais Humberto e Victoria, que com todo o amor, honestidade e força batalharam para proporcionar a melhor educação que poderiam oferecer, são meu orgulho e meu exemplo de vida. Aos meus irmãos Armando, José, Sebastian e Ana Maria que mesmo na distância são sempre o conforto fraternal.

Ao meu esposo, Rafael, que acredita sempre nas minhas capacidades e sempre tem me dado muito apoio para a realização deste mestrado, que não teria sido possível sem o seu incentivo e amor, serei eternamente grata.

Aos meus sogros, Álvaro e Rocio, Cunhados Fabian e Jenny pelo carinho e ânimo constantes.

Ao Prof. Dr. Antônio Carlos de Azevedo meu orientador, pela paciência, orientação, dedicação, disposição, amizade e colaboração durante todo o meu processo de formação.

Aos companheiros do Grupo de pesquisa em Mineralogia de solo (GPEMSO), em especial, agradeço ao Luís Silva, grande exemplo de profissional, pelo seu apoio e parceria. a Bruna e ao Rafael Cipriano da Silva, pelo seu trabalho, que foi um ponto de partida muito importante para o desenvolvimento desta dissertação, espero que seja possível atravessar fronteiras com essa parceria.

Aos pesquisadores Doutores e grandes amigos, Wilfrand Bejarano, Bruna Arruda e Rodolfo Lizcano, pelos questionamentos e sugestões que nortearam muitas das minhas decisões.

À Universidade de São Paulo (USP), em especial o departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (LSO - ESALQ), pela disponibilização do curso de mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro, através da concessão da bolsa de estudo até a conclusão do mestrado.

Aos funcionários do departamento de Ciência do Solo: Luiz Silva (*in memoriam*), Leandro Goya, Edineia Mondoni e Reginaldo Natalino Nogueira, por toda ajuda e apoio na realização das análises em laboratório.

Ao Professor José Alexandre Demattê por disponibilizar o equipamento suscetibilímetro, utilizado para realizar análises indispensáveis à essa dissertação.

Ao meu colega de mestrado João Henrique Silva da equipe de pesquisa (GEFA), pelas orientações e ajuda para realizar as análises de fósforo, em laboratório.

A todos os amigos que conquistei em Piracicaba e aos meus compatriotas da Colômbia que tornaram essa jornada mais leve e feliz.

Muito obrigada!

EPÍGRAFE

“A vida não é fácil para nenhum de nós. Devemos ter perseverança e, sobretudo confiança em nós. Crer que estamos dotados para algo e que isto deve ser alcançado” (Marie Curie).

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	10
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABELAS.....	12
1. INTRODUÇÃO.....	13
Referências.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL.....	19
2.1. Agrominerais silicatados.....	19
2.2. Suscetibilidade magnética (SM) na determinação indireta de atributos do solo.....	20
2.3. Solos tropicais.....	20
2.4. Fósforo no solo.....	21
2.5. Fracionamento do fósforo no solo.....	22
Referências.....	23
3. 3. DEPOSIÇÃO DE PÓ DE DIABÁSIO E SEU EFEITO NA DINÂMICA DO FÓSFORO EM SOLOS ADJACENTES A MINERADORAS SEM FERTILIZAÇÃO FOSFATADA. ..	29
Resumo.....	29
Abstract.....	29
3.1. Introdução.....	29
3.2. Material e Métodos.....	30
3.2.1 Estudo exploratório.....	30
3.2.1.1 Localização e amostragem.....	30
3.2.1.2 Preparo das amostras de solo.....	32
3.2.1.3 Determinação da suscetibilidade magnética (SM).....	32
3.2.2 Estudo de área com deposição direta de pó de rocha.....	32
3.2.2.1 Localização.....	32
3.2.2.2 Plano amostral e critério de escolha de amostras.....	33
3.2.2.3 Caracterização do pó de diabásio.....	34
3.2.2.4 Caracterização dos solos.....	35
3.2.2.4.1 Caracterização granulométrica e química.....	35
3.2.2.5 Determinação dos teores de Fe e Al cristalinos (Fe _{DCB} e Al _{DCB}) e teores de Fe e Al de baixa cristalinidade (Fe _{ox} e Al _{ox}).....	36

3.2.2.6 Determinação da suscetibilidade magnética (SM)	36
3.2.2.7 Curva de calibração de adição de pó de rocha.....	36
3.2.3 Análise estatística	37
3.3. Resultados e discussão.....	37
3.3.1 Suscetibilidade magnética (SM) nos locais selecionados na fase exploratória	37
3.3.2 Caracterização granulométrica e química para os locais E e G, Porto Feliz-SP.....	39
3.3.3 Teores de Fe_{DCB} , Al_{DCB} e Fe_{OX} , $Alox$ para os pontos E e G, Porto Feliz-SP.....	41
3.3.4 Caracterização química para o perfil do solo de cada local.....	41
3.3.5 Suscetibilidade magnética (SM) nas amostras E e G, Porto Feliz-SP	43
3.3.6 Curva de calibração de adição de pó de rocha	45
3.4. Conclusões.....	45
Referências	46
4. AMOSTRAS DE SOLO COM APLICAÇÃO DE PÓ DE DIABÁSIO E COM FERTILIZAÇÃO FOSFATADA.....	49
Resumo	49
Abstract.....	49
4.1. Introdução	50
4.2. Material e Métodos	50
4.2.1 Instalação e condução do experimento	50
4.2.2 Caracterização do pó de diabasio	51
4.2.3 Caracterização do solo	52
4.2.3.1 Determinação da suscetibilidade magnética (SM).....	53
4.2.3.2 Caracterização granulométrica e química das amostras de solo.....	53
4.2.3.3 Teores de Fe_{DCB} , Al_{DCB} e Fe_{OX} , $Alox$	53
4.2.4 Análise estatística	53
4.3. Resultados e Discussão.....	53
4.3.1 Caracterização do solo	53
4.3.2 Teores de Fe_{DCB} , Al_{DCB} e Fe_{OX} , $Alox$	56
4.3.3 Cálculo do conteúdo de P aportado pelas fontes aplicadas	56
4.4. Conclusões.....	57
Referências.....	58
5. AVALIAÇÃO DO FÓSFORO NAS AMOSTRAS DE SOLO COLETADAS	59

Resumo.....	59
Abstract	59
5.1. Introdução.....	59
5.2. Material e Metodos.....	60
5.2.1 Amostras de solo	60
5.2.2 Análises da adsorção de fósforo	60
5.2.3 Fracionamento químico do fósforo	61
5.2.4 Análise estatística	62
5.3. Resultados e Discussão	62
5.3.1 Adsorção e disponibilidade de P	62
5.3.2 Fracionamento químico do fósforo P	65
5.3.3 Compartimentos de fósforo segundo a labilidade	68
5.4. Conclusões.....	69
Referências	70
6. CONCLUSÕES GERAIS	73
APÊNDICES.....	75

RESUMO

Pó de diabásio e disponibilidade do P no solo

O pó de rocha gerado nas atividades de mineração, exibe propriedades físico-químicas nos solos, e tem evidenciando alto potencial, no aporte de nutrientes sendo em alguns casos usado como fertilizante natural. Nas últimas décadas se tem apresentado um aumento considerável no uso de agrominerais silicatados como fonte de nutrientes para o desenvolvimento de diferentes culturas, devido aos resultados positivos por sua aplicação. No entanto, ainda existem incertezas sobre seu uso, relativas ao seu comportamento contrastante ao dos fertilizantes. No Brasil, seu uso é aprovado pela legislação desde que cumpram os requisitos legais estabelecidos pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), sendo permitido o registro de pó de rocha como remineralizadores do solo. Em vários casos se tem observado incrementos no fósforo (P) disponível no solo após sua aplicação, fenômeno que carece de mais estudos quanto a origem dessa disponibilidade. A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a disponibilidade de P em amostras de solo submetidas a aplicação de pós de rocha. Para isso foram utilizadas amostras de solo de um latossolo vermelho amarelo que não tem recebido P via fertilizante (sem legado de P), mas com aplicações de pó de rocha, via deposição, amostras coletadas em área adjacente a uma mineradora de diabásio. Em contraste, com amostras de solo agrícola (legado de P) histórico de fertilização fosfatada, anteriores às aplicações de pó de rocha, coletadas em área experimental. As amostras de solo foram avaliadas quanto a disponibilidade de P, utilizando o fracionamento químico de fósforo. Assim com presença de pó de rocha por longos períodos de tempo e em grande quantidade não se tiver uma influência no incremento no teor de P no solo em locais próximos de mineradoras. Porém o uso de pó de rocha e um P que já estava no solo devido a fertilizações fosfatadas anteriores (legado de P), apresentou um incremento no P disponível, ao fazer a estimativa do aporte de P proveniente das apatitas do pó de rocha e tendo em conta sua capacidade de dissolução, elas não podem gerar esse grande incremento do P disponível, assim pode ser outro o mecanismo de liberação do P. pelo que ao estudar as liberdades / disponibilidade em amostras representativas onde tinha situações com legado de P e sem legado de P, a presença do pó de diabásio aumentou a concentração de P nas frações moderadamente a não lábil, do solo com legado de P, acontecendo algum efeito para esta liberação de P, que pode ser estudado em seguintes pesquisas.

Palavras-chave: Pó de rocha, Fósforo disponível, Fracionamento de fósforo, Suscetibilidade magnética

ABSTRACT

Diabase dust and P availability in soil

The rock dust generated in mining activities, exhibits physicochemical properties in soils, and has shown high potential, in the contribution of nutrients, being in some cases used as a natural fertilizer. In recent decades there has been a considerable increase in the use of silicate agrominerals as a source of nutrients for the development of different crops, due to the positive results of their application. However, there are still uncertainties about its use, related to its contrasting behavior to that of fertilizers. In Brazil, its use is approved by law as long as it meets the legal requirements established by the Ministry of Agriculture, Livestock and Supply (MAPA), allowing the registration of rock dust as soil remineralizers. In several cases, increases in phosphorus (P) available in the soil after its application have been observed, a phenomenon that requires further studies as to the origin of this availability. This research aimed to evaluate the availability of P in soil samples submitted to the application of rock powders. Soil samples were used from a yellow red oxisol that has not received P via fertilizer (no P legacy), but with rock dust applications, via deposition, samples collected in an area adjacent to a diabase miner. In contrast, with samples of agricultural soil (legacy of P) history of phosphate fertilization, prior to rock powder applications, collected in an experimental area. Soil samples were evaluated for P availability using chemical fractionation of phosphorus. Thus, with the presence of rock dust for long periods of time and in large quantities, there is no influence on the increase in P content in the soil in places close to mining companies. However, the use of rock dust and a P that was already in the soil due to previous phosphate fertilizations (legacy of P), showed an increase in the available P, when estimating the P input from the apatites in the rock dust and having considering their dissolution capacity, they cannot generate this large increase in available P, so the P release mechanism could be different. Therefore, when studying the labilities / availability in representative samples where there were situations with P legacy and without P legacy of P, the presence of diabasium powder increased the concentration of P in the moderately to non-labile fractions of the soil with P legacy, with some effect occurring for this P release, which can be studied in future research.

Keywords: Rock powder, Available phosphorus, Phosphorus fractionation, Magnetic susceptibility

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Georreferenciação da área de amostragem de solo em pontos adjacentes a das mineradoras de diabasio. (A) Município de Piracicaba-SP; (B) Município de Capivari- SP.	31
Figura 2 - Determinação da suscetibilidade magnética (SM) em subamostras de solo	32
Figura 3 - Localização da área de amostragem adjacente à mineradora de diabásio, município de Porto Feliz- SP.....	33
Figura 4 - Difratoograma do pó de rocha, amostra íntegra, obtida em área próxima a uma mineradora no município de Porto Feliz-SP.	35
Figura 5 - Teores de suscetibilidade magnética, para cada ponto de amostragem, na profundidade de 0-10 cm e 10-20 cm.....	38
Figura 6 - Teores médios de Suscetibilidade magnética (SM), em cada profundidade nos locais estudados.....	44
Figura 7 - Valores de suscetibilidade magnética (SM), em relação a doses crescentes de pó de rocha de diabasio no solo.	45
Figura 8 - Histórico do manejo da área experimental de Pirassununga- SP (2009-2015).....	51
Figura 9 - Difratoograma do pó de rocha íntegro empregado no estudo. Qz: quartzo; Ap: Apatita; Cpx: clinopiroxênio; Pl: plagioclásio; Ou: ortoclásio; Mag: magnetita; Ilm: ilmetita.....	52
Figura 10 - Esquema do fracionamento químico de P do solo, segundo Hedley	62
Figura 11 - Ajuste do modelo hiperbólico da isoterma de adsorção de Langmuir, para a quantidade de P adsorvido para cada um dos solos estudados.	64
Figura 12 - Frações de P, Solo sem legacy P 0-10 cm, local de amostragem com deposição de pó de rocha E e G e solo com legacy P 0-5 cm, amostras tratamento S: controle sem pó de rocha, GEX: Solo com aplicação de 19 Mg ha ⁻¹ do pó de rocha.	66
Figura 13 - Frações de P, solo com legacy P, amostras tratamento S: controle sem pó de rocha e GEX: amostras com aplicação de 19 Mg ha ⁻¹ do pó de rocha, coletadas na profundidade de 0-5 cm.	67
Figura 14 - Distribuição das frações de P no solo de acordo com sua labilidade, amostras de solo sem legacy P e com deposição de pó de rocha E e G profundidade 0-10 cm e solo com legacy P 0-5 cm, tratamento S: controle sem pó de rocha, GEX: Solo com aplicação de 19 Mg ha ⁻¹ do pó de rocha.	68
Figura 15 - Distribuição das frações de P, solo com legacy P, amostras tratamento S: controle sem pó de rocha e GEX: amostras com aplicação de 19 Mg ha ⁻¹ do pó de rocha, coletadas na profundidade de 0-5 cm.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localização das mineradoras selecionadas para coleta de amostras.	30
Tabela 2 - Teores de óxidos em porcentagem massa/massa da fonte avaliada.	34
Tabela 3 - Teores médios de parâmetros químicos e texturais do solo a 0-10 cm e 10-20 cm de profundidade. Médias das determinações em 5 amostras para cada local amostrado Porto Feliz- SP...	40
Tabela 4 - Teores médios de Fe e Al extraídos com DCB (FeDCB e AlDCB) ditionito citrato bicarbonato e oxalato de amônio-OX (Feox e Alox) e sua razão.	41
Tabela 5 - Resultados de parâmetros químicos em diferentes profundidades do perfil, para cada local amostrado E e G adjacente à mineradora Porto Feliz – SP.	42
Tabela 6 - Resultados de Fe e Al extraídos com oxalato de amônio (Feox e Alox) com ditionito citrato bicarbonato (Fe _{DCB} e Al _{DCB}) e relação entre os óxidos em diferentes profundidades do perfil, para cada local amostrado E e G adjacente à mineradora Porto Feliz – SP.	43
Tabela 7 - Teor SM, no perfil coletado a diferentes profundidades para cada ponto de amostragem....	44
Tabela 8 - Teores de óxidos em porcentagem massa/massa da fonte avaliada.	52
Tabela 9 – Teor médio de SM, tratamento GEX (19 Mg ha ⁻¹ de Pó) e S (controle) na profundidade 0-5 cm, para 5 repetições para cada tratamento.	54
Tabela 10 - Teores médios de elementos de análise química e granulométrica tratamento GEX (19 Mg ha ⁻¹ de Pó) e S (controle) na profundidade 0-5 cm, para 5 repetições para cada tratamento.	55
Tabela 11 - Teores médios de Fe e Al extraídos com oxalato de amônio (Feox e Alox), com (Fe _{DCB} e Al _{DCB}) e relação entre os óxidos tratamento GEX (19 Mg ha ⁻¹ de Pó) e S (controle) na profundidade 0-5 cm, para 5 repetições para cada tratamento.	56
Tabela 12 - Doses de P aplicadas durante o transcurso do experimento nos tratamentos S e GEX.	57
Tabela 13 - Teores médios de P-rem para os solos estudados solo sem legacy P na profundidade de 0-10 cm, local de amostragem com deposição de pó de rocha E e G 5 repetições por local e solo com legacy P na profundidade de 0-5 cm, GEX: (área com aplicação de 19 Mg ha ⁻¹ do pó de rocha) e tratamento S: (controle sem pó de rocha) e 5 repetições por tratamento.	63
Tabela 14 - Parâmetros da isoterma de Langmuir estimados por meio de ajustes de regressão linear para as amostras de solo estudadas em cada profundidade (0-5 cm e 0-10 cm).	65

1. INTRODUÇÃO

Atualmente (2022), o uso de fertilizantes no mundo está sendo afetado por questões políticas e econômicas, como a guerra entre Ucrânia e Rússia, e ambientais, como a finitude das reservas naturais em determinados países, que colocam em questionamento o atendimento das necessidades agrícolas de países que dependem da importação de adubação mineral, como ocorre com o Brasil. Este país é o quarto maior consumidor de fertilizantes no mundo, dependente da importação de aproximadamente 80% destes insumos. Este contexto internacional deu visibilidade à fragilidade do sistema produtivo brasileiro, Plano Nacional de Fertilizantes (Brasil, 2021). Além disso, com a estimativa de uma população superior a 10 milhões de habitantes até 2050, o fornecimento de fertilizante se converte em um limitante ao abastecimento da população (WRI – WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2019). Com isso, pesquisas em busca de fontes alternativas se fazem necessárias, e nesse contexto os remineralizadores, ou pó de rocha, vem ganhando destaque.

Os remineralizadores são produtos que podem ser registrados no Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), de acordo com a Lei 12.890, 10 de dezembro de 2013 (BRASIL – Instrução normativa N° 05, 10 de março de 2016) para o uso agrícola, e são referidos como agrominerais silicatados, sendo considerados uma tecnologia emergente que pode aliviar a necessidade de fertilizantes em graus variados, dependendo do contexto. Estes materiais têm ganhado relevância pelos resultados positivos por seu uso, com variada eficiência agrônômica em diferentes cultivos, com a vantagem de apresentar baixo custo e menor impacto ambiental em comparação com os fertilizantes minerais disponíveis no mercado. A aplicação de pó de rocha no solo, também denominada rochagem (Van Straaten, 2006), tem mostrado múltiplos resultados positivos como: i) fornecimento de nutrientes para as plantas; ii) neutralização da acidez do solo; iii) sequestro de carbono (Beerling et al., 2018); iv) aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) do solo; v) estímulo da atividade biológica; vi) incremento da qualidade do solo (Nunes et al., 2014) (Basak & Biswas, 2016) entre outras. Estes efeitos são bastante variáveis e dependem tanto das características da rocha quanto do solo e do clima no local onde se realiza a rochagem (Luchese et al., 2002; Beerling, 2017; Lefebvre et al., 2019; Swoboda et al., 2022). onde desempenham um papel importante parâmetros do solo como o pH, o pE (potencial redox), composição da solução do solo, atividade biológica e temperatura (Harley & Gilkes 2000; Hartmann et al., 2013). A rochagem pode ser realizada com diversos tipos de rochas como ígneas e sedimentares. Rochas ígneas básicas, como os basaltos e diabásio, possuem predomínio de minerais facilmente intemperizáveis e ricos em Silício (Si) e Alumínio (Al) além de cátions como Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Ferro (Fe) (Resende et al., 2006), assim como micronutrientes como: Cobre (Cu), Zinco (Zn), Boro (B) e Manganês (Mn) (Anda et al., 2015). Entretanto, esse tipo de rocha pode liberar quantidades significativas de elementos potencialmente tóxicos no ambiente como o cromo (Cr) e níquel (Ni), que afetam o solo tornando-o inapropriado para agricultura e pecuária (Resende et al., 2006).

No estado de São Paulo existem muitas mineradoras que produzem agregados (brita) para construção civil e pavimentação a partir de rochas ígneas, que devem passar pelo processo de cominuição (fragmentação), sendo inevitável que após essa etapa se produzam resíduos, como o pó fino, de pouco ou nenhum uso comercial, sendo descartado como resíduo pela construção civil. Porém, estudos vêm demonstrando que este material pode ser utilizado como agromineral silicatado, uma vez que geralmente cumpre com os requisitos estabelecidos para registro no MAPA. O efeito benéfico da aplicação do pó de rocha no solo é mais pronunciado com a diminuição do tamanho de partículas e com o aumento do tempo de contato entre o material e o meio. Isso porque com menor

tamanho das partículas do pó de rocha, se tem intemperismo dos minerais acelerado, aumentando a taxa de dissolução de silicatos expostos na superfície dos grãos. O uso de pó de rocha em áreas agrícolas é considerado uma tecnologia de emissão negativa (Negative Emission Technology – NET). Moosdorf et al. (2014) demonstraram a eficiência da rochagem no sequestro de CO₂ através do intemperismo acelerado (Taylor et al., 2015; Manning et al., 2013), com uma captura de 0,5 a 1,0 t de CO₂ em média por tonelada de pó de rocha aplicada no solo. Kelland et al., (2020) indicou taxas de sequestro de CO₂ de 2 a 4 t de CO₂ ha⁻¹, em um período de 1 a 5 anos após uma única aplicação de pó de rocha basáltica.

Outro efeito que tem sido relacionado com a aplicação de pó de rocha é o aumento da disponibilidade de nutrientes no solo. Em trabalhos conduzidos por Gillman (1980); Gillman et al. (2001) e Toscani et al., (2017) tem-se observado que o pó de rocha de basalto, durante um ano de aplicação em um Latossolo Vermelho distrófico, aportou minerais como albita, augita, anortita, além de apresentar minerais com estrutura 2:1 o que levou um incremento da disponibilidade de macro e micronutrientes no solo.

Esse incremento na disponibilidade de nutrientes devido a rochagem necessita mais avanços no conhecimento sobre os mecanismos envolvidos., já que os mesmos ainda não estão totalmente esclarecidos. Com isso a rochagem poderia ser um manejo alternativo para solos de baixa fertilidade química, como nos solos tropicais, onde a baixa disponibilidade do macronutriente, como o P, que limita a produção agrícola devido à alta adsorção e pouca mobilidade deste elemento no solo (Schlindwein et al., 2011). Esta grande afinidade dos solos em adsorver P tem sido manejada por elevadas aplicações de fontes de P, que excedem a quantidade requerida para suprir as necessidades da planta, porque objetivam também satisfazer e neutralizar a adsorção nestes grupos funcionais. A fração de P adsorvida nas partículas do solo, em geral, não é biodisponível e pode permanecer sem biodisponibilidade no solo por um longo tempo, sem ser absorvido pelas plantas, ou parte desse P pode ser dessorvido do solo e utilizado pelas plantas após vários ciclos de cultivo (Barrow 1983). Estes grandes reservatórios de P residual, que foram sendo acumulados durante décadas de aplicações sucessivas de fertilizante fosfatado, é denominado por alguns autores como legado de P (“legacy P”, no inglês) (Pavinato 2020). O legado de P tem um grande potencial para satisfazer a demanda de P nos sistemas de cultivo, pois este elemento permanece no solo, principalmente em formas não prontamente disponíveis para as culturas, mas que com práticas de manejo agrícola adequadas podem viabilizar sua disponibilidade, levando a uma maior eficiência do uso de P, reduzindo substancialmente a entrada de P via fertilizantes minerais e, assim, reduzir os custos de produção agrícola (Pavinato et al., 2020). O P caracterizado como legado de P se encontra predominantemente em formas inorgânicas (Pi) ligadas com alta energia à fração mineral, a compostos de Fe e Al e a formas orgânicas (Po), de maneira física e se encontram quimicamente estabilizadas, resultando em baixas concentrações de P com ligações de baixa energia que podem ser liberadas na solução do solo (Gatiboni et al., 2003). Deste modo, a dinâmica do legado de P e sua possível disponibilização está associada ao intemperismo (Gatiboni et al., 2013) e as características mineralógicas do solo (Camargo et al., 2012; Barbieri et al., 2013).

Um das formas que tem sido avaliada para disponibilizar o legado de P no solo é o uso de agrominerais silicatados a partir de rochas ígneas básicas (pó de rocha) em solos tropicais. Esta é uma prática que vem sendo estudada e devido a carência de conhecimentos dos possíveis mecanismos envolvidos na dessorção do P no solo, ainda requer da condução de ensaios científicos de longo prazo que avaliem efeitos cumulativos e co-benefícios potenciais ao longo de vários anos, e potencialmente décadas, que definam claramente os benefícios e problemáticas com seu uso. Dada a importância de compreender a influência do pó de rocha em solos com aplicação sucessiva de P via fertilizante e os mecanismos que possam estar envolvidos nestes resultados, se propõem o presente estudo, que

está apoiado em evidências de campo, tanto empíricas quanto experimentais (Silva 2016 e Tarumoto 2019) onde foi demonstrado o aumento da disponibilidade de P após a aplicação do pó de rochas ígneas básicas no solo. Esse fenômeno resulta de grande interesse, considerando que nestas rochas, apesar da presença de minerais fosfáticos, principalmente apatita, os mesmos estão em quantidades mínimas, não ultrapassando 1% de P₂O₅ total. Além disso, a solubilidade dos minerais presentes no pó de rocha é limitada. Neste trabalho testa-se a hipótese de que a aplicação de pó de rocha de diabásio produz mudanças na disponibilidade de P no solo, liberando-o para a solução do solo o legado de P, que se encontrava indisponível para a solução do solo. Para este fim, se busca comparar duas situações: a primeira constitui-se em um local que tem recebido pó de diabásio, mas que nunca tem recebido outra fonte de P, aplicação de fontes fosfatadas, portanto não tenha legado P. A segunda, um solo com uso agrícola com fertilização de P previa aplicação de pó de diabásio e, portanto, tenha legado P. Os objetivos do presente trabalho foram: 1. Verificar a influência do pó de rocha de diabásio em solos sem aplicação de P no solo 2. Em caso de haver um aumento de P lábil nos solos que receberam pó de diabásio, avaliar se o P é originado do pó de rocha ou em caso negativo, 3. Avaliar como a aplicação de pó de diabásio afeta as frações P no solo.

Referências

- Anda, M.; Shamsuddin, J.; Fauziah. CI. Improving chemical properties of a highly weathered soil using finely ground basalt rocks. *Catena* 124(1). 2015.147-161p.
- Barbieri, D. M.; Marques junior, J.; Pereira, G. T.; La Scala Junior, N.;Siqueira, D. S.; Panosso, A. R. Comportamento dos óxidos de ferro da fração argila e do fósforo adsorvido, em diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa*, v.37 p.1557-1568, 2013.
- Barrow, N.J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. *J. Soil Sci.* 1983, 34, 733–750.
- Basak, B. B., & Biswas, D. R. Potentiality of Indian rock phosphate as liming material in acid soil. *Geoderma*, 263, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.016>. 2016.
- Beerling, D.J., Leake, J.R., Long, S.P. et al. Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. *Nature Plants* 4, 138–147. 2018. <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0108-y>.
- Beerling, D.J., Enhanced rock weathering: biological climate change mitigation with co-benefits for food security? *Biol. Lett.* 13,4e7. 2017.
- BRASIL. Instrução Normativa nº 5, 10 de Março de 2016. Estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos pós de rocha e substratos para plantas, destinados à agricultura. *Diário Oficial da União, Brasília – DF. Seção 1 – 14 de Mar. De 2016. Nº 49, p.10.*
- BRASIL. Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. Altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os pós de rochas como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências. *Diário Oficial da União, Brasília – DF. Seção 1 – 11 de dez. de 2013, 1p.*
- BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (PNF 2050) Brasília: SAE, 2021, 195 p.1v.: il. Anexos.
- Camargo, L. A.; Marques Júnior, J.; Pereira, G. T.; Alleoni, L. R. F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. *Catena, Cremlingen*, 100, p.100-106, 2012.
- Gatiboni L.C.; Kaminski J.; Rheinheimer DS.; Brunetto G. (2003) Superphosphate and rock phosphates as phosphorus sources for grass-clover pasture on a limed acid soil in southern Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 34:2.503-2.514.

Gatiboni, L. C.; Brunetto, G.; Rheinheimer, D. S.; Kaminski, J. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações. In: ARAÚJO, A.P.; ALVES, B.J.R. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v.8, 2013.141-187p.

Gillman, G.P., Buekkett, D.C.; Coventry, R.J. A laboratory study of application of basalt dust to highly weathered soils: effects on soil cation chemistry. *Australian Journal of Soil Research*, Montpellier, v.39, p. 799-811, 2001.

Gillman, G.P., The effect of crushed basalt scoria on the cation exchange properties of a highly weathered soil. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, p.465-468, 1980.

Harley, A.D.; Gilkes, R.J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, n. 56, 2000. 11-36p.

Hartmann, J.; West, A.J.; Renforth, P.; Kohler, P.; La Rocha, C.L.D.; Wolf-Gladrow, D.A.; Dürr, H.H.; Scheffran, J.. Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification. *Rev. Geophys.* 51, 113–149.2013 (doi:10.1002/rog.20004).

Kelland M.E.; Wade P.W.; Lewis A.L.; Taylor L.L.; Sarkar B.; Andrews M.G.; Lomas M.R.; Cotton T.E.A.; Kemp S.J.; James R.H.; Pearce C.R.; Hartley S.E.; Hodson M.E.; Leake J.R.; Banwart S.A.; Beerling D.J. Increased yield and CO₂ sequestration potential with the C4 cereal *Sorghum bicolor* cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil. *Glob Chang Biol.* 2020 Jun;26(6):3658-3676. doi: 10.1111/gcb.15089. Epub 2020 Apr 21. PMID: 32314496.

Lefebvre D, Goglio P, Williams A, Manning DAC, Azevedo AC, Bergmann M, Meersmans J, Smith P. Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through Life Cycle Assessment: A case study for Sao Paulo State, Brazil. *Journal of Cleaner Production* 233(1), 2019. 468-481p.

Luchese, E. B.; Favero, L. O. B.; Lenzi, E. Fundamentos da química do solo, teoria e prática. 2. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2002. 182p.

Ma, J. F.; Miyake, Y.; Takahashi, E. Silicon as a beneficial element for crop plant. In: Datnoff, L. E.; Snyder, G. H.; Korndörfer, G. H. (Eds.). *Silicon in agriculture*. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. p. 17-39.

Manning, D. A. C., Renforth, P., Lopez-Capel, E., Robertson, S., & Ghazireh, N. (2013). Carbonate precipitation in artificial soils produced from basaltic quarry fines and composts: An opportunity for passive carbon sequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 17, 309–317.

Moosdorf, N., Renforth, P., & Hartmann, J. Carbon dioxide efficiency of terrestrial enhanced weathering. *Environmental Science and Technology*, 48(9), (2014). 4809–4816p.

Nunes J.M.G.; Kautzmann, R. M.; Oliveira, C. Evaluation of the natural fertilizing potential of basalt dust wastes from the mining district of Nova Prata (Brazil). *Journal of Cleaner Production* 84(1) (2014):649-656p.

Pavinato, P. S., Cherubin, M. R., Soltangheisi, A., Rocha, G. C., Chadwick, D. R., & Jones, D. L. (2020). Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. *Scientific Reports*, 10(1), 1-11.

Rajan, S.S.S.; Casanova, E. & Truong, B. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rocks, with a case-study analysis. In: ZAPATA, F. & ROY, R.N., eds. *Use of phosphate rocks for sustainable agriculture*. Roma, FAO, 2004. p.41-57

Resende, A.V.; Machado, C.T.T.; Martins, E.S.; Sena, M.C.; Nascimento, M.T.; Silva, L.C.R.; Linhares, N.W. Rochas como fontes de potássio e outros nutrientes para culturas anuais. *Espaço & Geografia*, Brasília, v. 9, n. p. 135-161, 2006.

Schindwein, J.A.; Bortolon, L. & Gianello, C. Soil phosphorus available for crops and grasses extracted with three soil-test methods in Southern Brazilian soil amended with phosphate rock. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 42:283-292, 2011.

Silva, R. C. da. Intemperismo de minerais de um remineralizador. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 2016.183 p.

Swoboda, P.; Döring, T. F., & Hamer, M. (2021). Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. *Science of the Total Environment*, 150976.

Taylor, L. L.; Quirk, J.; Thorley, R. M. S.; Kharecha, P. A.; Hansen, James.; Ridgwell, A.; Lomas, M. R.; Banwart, S. A.; Beerling, D. J. Enhanced weathering strategies for stabilizing climate and averting ocean acidification. *Nature Climate Change* 6, 2015, 402-406p.

Toscani, G. dá S. R.; Campos, G. E. J. Uso de pó de basalto e rocha fosfatada como remineralizadores em solos intensamente intemperizados. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 36, n. 2, p. 259 – 274, 2017.

Van Straaten, P. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, Brasília, p. 732-747, 2006.

WRI – World Resources Institute. Creating a Sustainable Food Future. In. *World Resources Report, Creating a Sustainable Food Future: A Menu of Solutions to Feed Nearly 10 billion People by 2050*.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL

2.1. Agrominerais silicatados

Os agrominerais compreendem os insumos de origem mineral que passam por processos mecânicos de redução do tamanho de suas partículas e que são aplicados ao solo com fins agrícolas por proporcionarem melhorias em suas propriedades. No Brasil, os estudos sobre a utilização de rocha moída como fonte de nutrientes tiveram início com os trabalhos desenvolvidos por Ilchenko e Guimarães (1953) e Catani e Gallo (1960). Mas só entre as décadas de 1970 e 1980 as pesquisas com a rochagem se intensificaram, com os estudos desenvolvidos por Leonardos et al., (1976), desde então, diversos trabalhos têm sido realizados em todas as regiões brasileiras (Motta e Feiden, 1992; Escosteguy e Klamt, 1998; Lopes-Assad et al., 2006; Martins et al., 2008; Theodoro et al., 2013; Silva et al., 2017).

Dentre as diferentes rochas que podem ser utilizadas como agrominerais silicatados, as rochas ígneas básicas, como basalto e diabasio, amplamente utilizadas na produção de britas e materiais de uso civil, geram subprodutos como o pó de rocha que têm demonstrado resultados favoráveis para o desenvolvimento de diferentes culturas (Gillman et al., 2001; Melamed et al., 2009; Anda et al., 2009; Melo et al., 2012; Ramos et al., 2014; Manning, 2015). O pó de rocha gerado durante a moagem deste material resulta em um produto final com diversas granulometrias, com partículas mais leves e outras mais pesadas, as quais ao serem submetidas às condições meteorológicas e topográficas de um local, podem apresentar efeitos benéficos ou em certos casos tornarem-se poluentes atmosféricos. Tais poluentes podem ser introduzidos nos ecossistemas terrestres por meio de deposições secas e úmidas, que se acumulam no meio ambiente com o tempo (Djebbi et al., 2017). Estas deposições com caráter poluente podem estar acontecendo há muitas décadas, tendo em conta a data de funcionamento das mineradoras onde se realiza extração desta rocha. Um fator determinante na emissão de poluentes para a atmosfera é a taxa de intemperismo dos minerais litogênicos presente no pó de rocha, já que esta taxa é elevada significativamente com o aumento de área superficial específica produzido pela cominuição.

Como efeito benéfico da aplicação de pó de rocha pode haver incrementos em alguns nutrientes no solo. Isso porque as rochas básicas apresentam minerais silicatados na sua estrutura que são facilmente alteráveis, como piroxênios e plagioclásios, sendo importante fonte de elementos minerais para o solo pela presença em sua estrutura de cátions básicos, como Ca, Mg, K, e também altos teores de Si, Fe e Al (Resende et al., 2002). Uma vez na fase líquida, estes elementos podem interagir com os grupos funcionais de superfícies dos colóides minerais ou orgânicos através de processos como adsorção, formação complexos de esfera interna e externa, complexação, quelação, podendo ser absorvido pelas células vivas do solo (microbioma, raízes, etc.) ou transportado em solução (lixiviação, eluição, etc.), já que cada elemento tem uma dinâmica particular em contato com a solução do solo. Motta e Feiden (1992) constataram que a aplicação de um remineralizador (RM) de basalto foi suficiente para elevar o nível de P disponível, comportando-se como uma adubação corretiva do solo. No entanto, esses autores recomendam o uso de doses elevadas, com valores de até 100 Mg ha⁻¹. Outros autores também reportaram um aumento na liberação e concentração de P e Si na solução do solo, cujo efeito foi diretamente proporcional às doses de RM aplicadas e ao período de incubação (Gilman et al., 2001; Anda et al., 2009; Anda et al., 2013).

2.2. Suscetibilidade magnética (SM) na determinação indireta de atributos do solo

Para determinação de atributos do solo tem-se utilizados diferentes metodologias, sendo que algumas são destrutivas e outras não-destrutivas. Dentre as técnicas não destrutivas pode-se citar o uso de sensoriamento remoto aplicadas no estudo de solos, que pode auxiliar na determinação de seus atributos como a suscetibilidade magnética (SM) permitindo assim a identificação e quantificação de atributos mineralógicos, como são óxidos de ferro, geração de resultados rápidos, baixo custo, além de ser uma técnica não-destrutiva quando comparada com métodos químicos e físicos utilizados em laboratório (Silvero et al., 2019). Entretanto, deve-se considerar que alguns fatores como relevo (Jong et al., 2000), material de origem (Silva et al., 2010), clima (Dearing et al., 2001; Maher et al., 2003), tempo (White e Walden, 1997), erosão (Hanesch e Scholger, 2005), fauna/flora (Dearing et al., 1995), regime hídrico (Maher, 1998) e fatores antropogênicos (Hanesch e Scholger, 2005) podem influenciar no sinal magnético e portanto na determinação dos parâmetros obtidos com essa técnica.

A determinação da SM é realizada pela aplicação de um campo magnético cujo equilíbrio resultante será dependente da combinação dos minerais presentes no solo (Souza Júnior et al., 2010). O sinal magnético varia em função do tipo de mineral e do conteúdo de Fe presentes no material avaliado (Singh et al., 2020). Minerais classificados como ferrimagnéticos, apresentam forças magnéticas desiguais (spins), prevalecendo o momento magnético de maior número de spins no mesmo sentido, como ocorre com a magnetita e maghemita, dando origem a uma expressão magnética mais pronunciada. A magnetita, de origem litogênica, quando presente no solo, confere elevados valores de SM, e está normalmente associada às rochas máficas ou básicas. A maghemita, de origem pedogênica, pode ser formada da oxidação direta da magnetita (Jordanova et al., 2013). Desta forma, devido a relação direta entre a SM e os minerais presentes nos solos, esta técnica pode ser usada como pedoindicador em funções de pedotransferência (Souza Júnior et al., 2010). Espera-se que a SM permita identificar se tem presença de pó de rocha no solo.

2.3. Solos tropicais

Os solos tropicais são encontrados dentro das linhas imaginárias definidas como linhas dos trópicos de Capricórnio e de Câncer, sobre a superfície terrestre, posicionados segundo um paralelo ao equador. No Brasil, com grande parte do seu território localizado na região tropical, que ocorre na faixa que se estende desde o extremo norte do Estado de Roraima (aproximadamente 5 graus N) até a cidade de São Paulo (aproximadamente 23,5 graus ao sul do Equador). Mais ao sul desta latitude de São Paulo ocorrem solos muito semelhantes, porém sob domínio climático subtropical (compreendendo parte do estado de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul). Devido às condições de (clima, relevo, material de origem e cobertura vegetal) favorecem a formação de solos altamente intemperizados, como os Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos, que apresentam, em condições naturais, altos teores de argila, óxidos e hidróxidos de Fe e Al e minerais 1:1 (caulinita) na fração argila (Parfitt, 1979), elevada acidez e baixa fertilidade. Nesse tipo de solo é comum ser observado baixos teores de P proveniente do material de origem, já que este é originado a partir de rochas ígneas, com baixos teores de P (Fink et al., 2016; Celi et al., 2020). Isso se deve à alta eletropositividade e adsorção aniônica, menor capacidade de troca de cátions e redução da saturação de bases. Assim, esses solos podem ser catalogados como drenos, pela competição que tem com a planta pelo P aplicado na fertilização (Novais; Smyth, 1999), sendo indicada a adubação fosfatada para o uso agrícola (Teles et al., 2017; Weil e Brady, 2017).

2.4. Fósforo no solo

O P é um elemento pouco abundante na crosta terrestre, concentrando-se principalmente em jazimentos sedimentares e, secundariamente, em jazimentos magmáticos (Rajan et al., 2004). Dentre as principais fontes de P na natureza está a rocha fosfatada (apatita), conhecida como fosfato natural (Spier et al., 2020). Os fosfatos naturais podem ser de origem vulcânica (ígneas) ou sedimentar. Aqueles de origem ígnea são de baixíssima solubilidade tanto em água como em ácido e, portanto, quando aplicados com fins de fertilização podem gerar eficiência agrônômica próxima de zero (Kliemann et al., 2009). Por outro lado, os fosfatos naturais reativos de origem sedimentar podem apresentar maior solubilidade. Assim, a eficiência agrônômica dos fosfatos naturais reativos é variável, dependendo das condições de solo em que o mesmo será aplicado (Santos et al., 2008). Para aumentar a eficiência dos fosfatos naturais reativos pode-se promover o rompimento da sua estrutura cristalina através de processos industriais, gerando um produto com maior quantidade de P solúvel.

A dinâmica do P no solo está associada às propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo e aos fatores climáticos que controlam a atividade dos microrganismos, causadores da imobilização e mineralização dos íons fosfato (Conte et al., 2003). Em condições tropicais, com alto grau de intemperismo, cerca de 70 a 80% do P que é aplicado via fertilizante fica retido nos colóides, sais, óxidos de Fe e Al do solo, que “fixam” este nutriente o indisponibilizando às plantas (Fan et al., 2020). Por isso, nessas condições se faz necessária a aplicação de quantidades de fertilizantes fosfatados, que em geral, superam em muito as extrações das culturas. Da quantidade total de P aplicada nos solos, apenas uma pequena parte pode ser recuperada em um ciclo de cultivo agrícola, deixando um remanescente de P no solo, que inicialmente não é biodisponível e permanece sem biodisponibilidade por outros ciclos, mas que pode ser utilizado pelas plantas durante os seguintes ciclos (Barrow et al., 1976). A prática de aplicação de altas doses de P tem como consequência o acúmulo deste nutriente por um longo período de tempo, com saturação dos sítios de ligação e aumento da possibilidade de perdas por lixiviação (Mcdowell et al., 2001). Estes grandes reservatórios de P residual acumulado durante décadas de cultivo, é denominado por alguns autores como o legado de P (“legacy P”, do termo em inglês) e tem um grande potencial para cobrir a demanda de fertilizantes nos sistemas de cultivo no futuro, pois permanece no solo, principalmente em formas não prontamente disponíveis para as culturas. Para disponibilizar o legado de P do solo algumas práticas de manejo agrícola podem ser aplicadas na agricultura, levando a uma eficiência do uso de P, reduzindo substancialmente a necessidade da entrada de P via fertilizantes e, assim, reduzindo o custo de produção agrícola (Pavinato et al., 2020).

O P em formas disponíveis na solução do solo encontra-se nas formas iônicas H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} e PO_4^{3-} . quando o pH es bajo tende a dominar a forma monovalente H_2PO_4^- , a forma divalente HPO_4^{2-} empeza a aparecer a pH = 4 e alcança um máximo a pH = 9, os dos iones estão em equilíbrio a pH = 7. A disponibilidade de P para as plantas depende das formas presentes no solo do nutriente como inorgânico (Pi) e orgânico (Po) (Delgado; Torrent, 2000). Para o P, é possível avaliar os diferentes níveis de labilidade, como: fração lábil, fração moderadamente lábil; fração de labilidade restrita e fração não lábil.

Outro parâmetro que pode ser usado para avaliar a dinâmica do P no solo é fósforo remanescente (P-rem), que é um índice utilizado para quantificar a capacidade de retenção do P pelo solo (Arruda et al., 2017), sendo que quanto maior esse índice, maior é a retenção de P pelo solo, após determinado intervalo de tempo. O P-rem representa a quantidade do P adicionada no solo que fica na solução de equilíbrio após determinado tempo de contato com o solo, e possibilita a definição de doses mais adequadas de P para a determinação da como a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) (Alvarez et al., 2000). Assim, as recomendações de quantidade de

fertilizantes de P de acordo com o P-rem possuem alta correlação com a textura, mineralogia do solo, e com os teores de matéria orgânica. Tanto a avaliação da labilidade do P quanto o P-rem são parâmetros muito utilizados, obtidos a partir de experimentos laboratoriais após adição de doses do elemento e estimulada pelo uso de modelos empíricos.

Outra avaliação possível é a sorção do P no solo. Existem vários modelos de regressão para descrição e quantificação da sorção de P em solos, dentre esses as isotermas de sorção de Langmuir e Freundlich são amplamente estudadas (Costa et al., 2014; Hadgu et al., 2014; Tamungang et al., 2016). O uso destas isotermas permite avaliar os efeitos de diversas características do solo sobre a sorção de P em solos, sendo esses efeitos encontrados principalmente para capacidade máxima de sorção de P (Maximum Phosphorus Adsorption Capacity, MPSC, do termo em inglês), teores de argila, P-rem, teores de óxidos de Fe e Al, pH, teores de matéria orgânica e teores de alumínio trocável.

Assim, o grau de estabilidade química e o abastecimento da solução do solo por formas orgânicas e inorgânicas de P determinam se os fosfatos são lábeis, moderadamente lábeis ou não-lábeis. Sendo assim, a forma e interação que o P está realizando com os sítios de adsorção do solo determinará um maior ou menor grau de estabilidade destes compostos (Gatiboni et al., 2007; Pavinato et al., 2010).

2.5. Fracionamento do fósforo no solo

Diversos métodos de extração sequencial do P no solo têm sido desenvolvidos, uma perspectiva proposta é dividir o P do solo em vários compartimentos, utilizando soluções químicas definidas com forças crescente de extração deste nutriente para a solução extratora e posterior determinação, utilizado principalmente em experimentos para fins acadêmicos (Johnson et al., 2003). Um dos métodos usados amplamente é o proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) que utiliza, sucessivamente, em uma mesma amostra de solo, substâncias químicas com diferentes forças de extração, as quais removem Pi e Po das formas mais fracamente retidas até as formas não-lábeis, sendo divididas conforme sua disponibilidade às plantas (Cross; Schlesinger, 1995), assumindo que cada fração tem uma assimilação similar em solos diferentes (Guo et al., 2000).

Metodologicamente, uma mesma amostra de solo é submetida a extrações sequenciais descritas brevemente a seguir. A fração lábil é representada por formas que estão em equilíbrio com o P-solução (Fu et al., 2020). A resina trocadora de ânions (RTA) extrai as formas de Pi mais lábeis no solo, representando a fração que está sendo retida por força eletrostática nos coloides e que está na solução do solo (Raij et al., 2001). O Bicarbonato de sódio (NaHCO_3 0,5 mol L⁻¹) a pH 8,5 extrai parte do fósforo inorgânicas (Pi) e orgânico (Po) das frações facilmente disponíveis pelas plantas. As formas de Po e de Pi extraídos com hidróxido de sódio (NaOH 0.1 mol L⁻¹) são moderadamente lábeis, estando adsorvidas quimicamente nos óxidos de Fe e Al (Pi) e associadas com substâncias húmicas (Po). O extrator NaOH 0,5 mol L⁻¹ combinado com ultrassom permite a liberação de Pi e Po protegidos fisicamente e de muito baixa biodisponibilidade. A fração não lábil representa as formas de fósforo precipitados (Fe e Al) ou absorvidos na fração argila. Os fosfatos de cálcio são removidos principalmente pelo extrator HCl (1,0 mol L⁻¹). Por último, com a digestão do solo residual com ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) é determinado o P residual, sendo Pi e Po que estão quimicamente estáveis.

Existem diferentes modificações à metodologia proposta por Hedley et al. (1982) as quais procuraram facilitar as extrações e aumentar a eficiência na determinação das diferentes frações avaliadas. Posteriormente, as modificações propostas por Condron et al. (1985) aderiram a alteração propostas por Hedley et al. (1982) e, adicionaram a substituição da extração com NaOH 0,1 mol L⁻¹ com ultrassonificação por uma extração com NaOH

0,5 mol L⁻¹, dispensando o uso do ultrassonificador, e alterando também a ordem de extração, com a utilização do extrator HCl antes do extrator NaOH 0,5 mol L⁻¹, com o objetivo de melhorar a eficiência da extração (Gatiboni et al., 2013).

Referências

Alvarez, V., V.H.; Novais, R.F.; Dias, L.E.; Oliveira, J.A. 2000. Determinação e uso do fósforo remanescente. Boletim Informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 25, p. 27-32.

Anda, M.; Chittleborough, D.J.; Fitzpatrick, R.W. 2009 Assessing parent material uniformity of a red and black soil complex in the landscapes. *Catena*, Amsterdam, v. 78, n. 2, p. 142-153, aug.

Anda, M.; Shamshuddin, J.; Fauziah C.I. 2013. Increasing negative charge and nutrient contents of a highly weathered soil using basalt and rice husk to promote cocoa growth under field conditions. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam v.132, p. 1-11, aug.

Arruda, J. A.; Medeiros, E. J. W.; Oliveira, F. J. L.; Azevedo, S. S. J. 2017. Fósforo remanescente em solos do Seridó Paraibano. *Revista Principia*, 35: 42-49.

Barrow, N.; Shaw, T. 1976. Sodium bicarbonate as an extractant for soil phosphate, I. Separation of the factors affecting the amount of phosphate displaced from soil from those affecting secondary adsorption. *Geoderma*, 16, 91-107.

Catani, R.A., Gallo, J.R. 1960. A disponibilidade do potássio da "Leucita de Poços de Caldas", estudada por meio do arroz. *Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"*. 17, 30-35.

Celi, L., Prati, M., Magnacca, G., Santoro, V., Martin, M. 2020. Role of crystalline iron oxides on stabilization of inositol phosphates in soil. *Geoderma* 374:1-11.

Conte, E.; Anghinoni, I.; Rheinheimer, D. 2003. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 27, p. 893-900.

Costa, D. B., Batista, A.K.P., Monteiro, D.S. S.A., Simões, N. D. E., Freire, F.J. Almeida, O.E.C. (2014) Adubação fosfatada em cana planta e soca em Argissolos do Nordeste de diferentes texturas. *Revista Caatinga*, 27: 47-56.

Cross, A.F.; Schlesinger, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, Amsterdam, v. 64, n. 3, p. 197-214, 1995.

Dearing, J.A., Less, J.A., White, C. 1995. Mineral magnetic properties of acid gleied soils under oak and corsican pine. *Geoderma* 68:309-319.

Dearing, J.A., Livingstone, I.P., Bateman, M.D., White, K. 2001 Palaeoclimate records from ois 8.0-5.4 recorded in loess-palaeosol sequences on the matmata plateau, southern tunisia, based on mineral magnetism and new luminescence dating. *Quaternary International* 76-77:43-56.

Delgado, A., Torrent, J. 2000. Phosphorus Forms and Desorption Patterns in Heavily Fertilized Calcareous and Limed Acid Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 64 (6). 2031-2037 doi:10.2136/sssaj2000.6462031x

Djebbi, C. & Chaabani, Fredj & Font, Oriol & Queralt, Ignasi & Querol, Xavier. (2017). Atmospheric dust deposition on soils around an abandoned fluorite mine (Hammam Zriba, NE Tunisia). *Environmental Research*. 158. 153. 10.1016/j.envres.2017.05.032.

Escosteguy, P.A.V., Klamt, E. 1998. Basalto moído como fonte de nutrientes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 22, 11-20.

Fan, B., Ding, J., Fenton, O., Daly, K., Chen, Q. 2020. Understanding phosphate sorption characteristics of mineral amendments in relation to stabilizing high legacy P calcareous soil. *Environmental Pollution* 261:1-11.

Fink, J.R., Inda, A.V., Bavaresco, J., Barrón, V., Torrent, J., Bayer, C. 2016. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. *Soil and Tillage Research* 155:62-68.

Gatiboni, L.C.; Kaminski, J.; Rheinheimer, D.S.; Flores, J.P.C. 2007. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 691-699.

Gatiboni, L.C.; Brunetto, G.; Rheinheimer, D.S.; Kaminski, J. 2013. Fracionamento químico das formas de fósforo no solo: usos e limitações. In: *SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, v. 8, p. 141-187.

Gillman, G.P., Burkett, D.C., Coventry, R.J. 2001. A laboratory study of application of basalt dust to highly weathered soils: effect on soil cation chemistry. *Australian Journal of Soil Research*. 9, p.799-811.

Guo, F.; Yost, R.S.; Hue, N.V.; Evensen, N.I.; Silva, J.A. 2000. Changes in phosphorus fractions in soils under intensive plant growth. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 64, n. 5, p. 1681-1689.

Hanesch, M., Scholger, R. 2005. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. *Geophysical Journal International* 161.p.50-56.

Hadgu, F., Gebrekidan, H., Kibret, K., Yitaferu, B. 2014. Study of phosphorus adsorption and its relationship with soil properties, analyzed with Langmuir and Freundlich models. *Agriculture, Forestry and Fisheries*, 3.p.40-51.

Hedley, M.J.; Stewart, J.W.B.; Chauhan, B.S. 1982. Changes in inorganic and organic soil-phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 46, n. 5, p. 970-976.

Ilchenko, W., Guimarães, D., 1953. Sobre a utilização agrícola dos sienitos nefelínicos do Planalto de Poços de Caldas. MG. Inst. Tecn. Avulso. 15. 16p.

Jong, E., Pennock, D.J., Nestor, P.A. 2000. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in saskatchewan, Canada. *Catena* 40.p.291-302.

Johnson, A.H.; Frizano, J.; Vann, D.R. 2003. Biogeochemical implications of labile phosphorus in forest soils determined by the Hedley fractionation procedure. *Oecologia*, Berlín, v. 135, n. 4, p.487-499.

Jordanova, N., Jordanova, D., Liu, Q., Hu, P., Petrov, P., Petrovský, E. 2013. Soil formation and mineralogy of a Rhodic Luvisol—insights from magnetic and geochemical studies. *Global and Planetary Change* 110:p.397-413.

Kliemann, H. J.; Lima, D. V. 2007. eficiência agronômica de fosfatos naturais e sua influência no fósforo disponível em dois solos de cerrado. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 31, n. 2, p.111–119.

Leonardos, O.H., Kronberg, B.I., Fyfe, W.S. 1976. Rochagem: método de aumento de fertilidade em solos lixiviados e arenosos. *Congresso Brasileiro de Geologia, Anais...Ouro Preto: SBG.* 1.p.137-145.

Lopes-Assad, M.L., Rosa, M.M., Erler, G., Ceccato-Antonini, S.R. 2006. Solubilização de pó de rocha por *Aspergillus niger*. *Espaço & Geografia.* 9, p.1-17.

Maher, B.A. 1998. Magnetic properties of modern soils and quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 137: p.25-54.

Manning, D. A. C. 2015. How will minerals feed the world in 2050? *Proceedings of the Geologists' Association*, v. 126, n. 1, p. 14–17.

Martins, E.S., Oliveira, C.G., Resende, A.V.; Matos, M.S.F. 2008. Agrominerais – Rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de Potássio para a Agricultura. In: Adão B. Luz e Fernando Lins (eds.), *Rochas e Minerais Industriais – Usos e Especificações*, Rio de Janeiro: CETEM.p.205-221.

Maher, B.A., Alekseev, A., Alekseeva, T. 2003. Magnetic mineralogy os soils across the russian steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 201:321-341.

McDowell, R.; Sharpley, A. & Folmar, G. 2001. Phosphorus export from an agricultural watershed: Linking source and transport mechanisms. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v. 30, p. 1587-1595.

Melamed, R., Gaspar, J.C., Miekeley, N. 2009. Pó de Rocha como Fertilizante Alternativo para Sistemas de Produção Sustentáveis em Solos Tropicais. Brasília: Cetem/mct. p. 26 (Série estudos e documentos 72).

Melo, V. F.; Uchoa, S. C. P.; Dias, F. de O.; Barbosa, G. F. Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. *Acta Amazonica*, vol.42, n.4, 2012, p. 471-476. ISSN 0044-5967.

Motta, A.C.V., Feiden, A. 1992. Avaliação do P em LE submetido a diferentes doses de basalto. *Agrárias*, Curitiba, 12, 47-54.

Novais, R.D.; Smyth, T.J. 1999. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 399 p.

Parfitt, R. Anion adsorption by soils and soil materials. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 30, n. 1, p. 1-50, 1979.

Pavinato, P.; Dao, T.; Rosolem, C. 2010. Tillage and phosphorus management effects on enzyme-labile bioactive phosphorus availability in Cerrado Oxisols. *Geoderma*, Amsterdam, v. 156, n. 3, p. 207-215.

Pavinato, P. S., Cherubin, M. R., Soltangheisi, A., Rocha, G. C., Chadwick, D. R., & Jones, D. L. 2020. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. *Scientific Reports*, 10(1), 1-11.

Ramos, C.G.; Mello, A.G.; Kautzmann, R.M. 2014. A preliminary study of acid volcanic rocks for stone meal application. *Environmental Nanotechnology, Monitoring e Management*, Miami, v.1-2, p. 30–35, Jan.

Raij, B. van; Andrade, J.C.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. 2001. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico.285 p.

Rajan, S.S.S.; Casanova, E. & Truong, B. 2004, actorsaffecting the agronomic effectiveness of phosphate rocks,with a case-study analysis. In: ZAPATA, F. & ROY, R.N.,eds. Use of phosphate rocks for sustainable agriculture.Roma, FAO, p.41-57

Resende, M.; Curi, N.; Rezende, S. B.; Corrêa, G. F. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. Viçosa: Neput, 2002. 338 p.

Santos, H.G, Dos.; Jacomine, P.K.T.; Anjos, L.H.C. Dos.; Oliveira, V.A. De.; Lumbreras, J.F.; Coelho, M.R.; Almeida, J.A. De.; Araujo Filho, J.C. De.; Oliveira, J.B. DE. Cunha, T.J.F. 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5a ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

Silva, A.R.; Souza, J.I.G.; Costa, A.C.S. 2010. Magnetic susceptibility of B horizon of soils in the state of Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34: 329-337.

Silva, R.C., Cury, M.E., Ieda, J.J.C., Sermarini, R.A., Azevedo, A.C. 2017. Chemical attributes of a remineralized Oxisol. *Ciência Rural*. 47, 1-10.

Silvero, N.E.Q.; Siqueira, D.S.; Coelho, R.M.; Ferreira Júnior, D. da C.; Marques Júnior, J.M. 2019 Protocol for the use of legacy data and magnetic signature on soil mapping of São Paulo Central West, Brazil. *Science of The Total Environment*, v. 693, 13346325, Nov.

Singh, J., Sangode, S.J., Bagwan, M.F., Meshram, D.C., Dhobale, A. 2020. Episodic ferricretization of the deccan laterites (India): inferences from ore microscopy, mineral magnetic and xrd spectroscopic studies. *Journal of Earth System Science* 129:1-12.

Souza, Júnior. I.G., Costa, A.C.S., Vilar, C.C., Hoepers, A. 2010. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. *Ciência Rural* 40:513-519.

Spier, C.A., Kumar, A., Nunes, A.P.L. 2020. Mineralogy and genesis of rare al-phosphate minerals in weathered itabirite and iron ore from the quadrilátero ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews* 118:1-12.

Tamungang, N. E. B., Mvondo-Ze, A. D., Alakeh, M. N., Adalbert, O. A. (2016). Phosphorus adsorption isotherms in relation to soil characteristics of some selected volcanic affected soils of Foubot in the West Region of Cameroon. *International Journal of Soil Science*, 11: 19-28.

Teles, A. P. B.; Rodrigues, M.; Bejarano, H.W.F., Soltangheisi, A., Sartor, L. R., Withers, P. J. A., Pavinato, P. S. 2017. Do cover crops change the lability of phosphorus in a clayey subtropical soil under different phosphate fertilizers? *Soil Use and Management*, v. 33, p. 34-44.

Theodoro, S.H., Leonardos, O., Rocha, E.D., Macedo, I. Rego, K.G. 2013. Stonemeal of amazon soils with sediments from reservoirs: a case study of remineralization of the tucuruí degraded land for agroforest reclamation. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 85, p.23-24.

Weil, R.R. and Brady, N.C. (2017) *Soil Phosphorus and Potassium. The Nature and Properties of Soils*, 2002, p.643-695.

White, K., Walden, J. 1997. The rate of iron oxide enrichment in arid zone alluvial fan soils, tunisian southern atlas, measured by mineral magnetic techniques. *Catena* 30:p.215-227.

3. DEPOSIÇÃO DE PÓ DE DIABÁSIO E SEU EFEITO NA DINÂMICA DO FÓSFORO EM SOLOS ADJACENTES A MINERADORAS SEM FERTILIZAÇÃO FOSFATADA.

Resumo

No estado de São Paulo há muitas mineradoras que produzem agregados (brita), utilizados na construção civil e pavimentação, que são gerados a partir de rochas ígneas, como o diabásio. As rochas passam por um processo de cominuição (fragmentação) para obtenção de um material particulado. Em esse processo ocorre a produção de um pó fino (pó de rocha) com granulometria variável entre 2,0 e 0,05 mm, com pouco ou nenhum uso comercial para indústria civil, que quando utilizado na indústria agrícola como um insumo tem exibido melhoras nas propriedades físico-químicas nos solos, evidenciando um alto potencial em pesquisas feitas com diferentes culturas, dentre eles o aumento na disponibilidade de nutrientes, como o fósforo (P). O objetivo deste trabalho foi avaliar como o uso de pó de diabásio na agricultura afeta a dinâmica de P no solo, ao longo do tempo. Para isso foram avaliados solos adjacentes a três mineradoras, localizadas na depressão Periférica Paulista, nos municípios Piracicaba, Capivari e Porto Feliz, utilizando o registro de susceptibilidade magnética (SM - técnica de sensoriamento do solo) que permite a identificação e quantificação de minerais ferrimagnéticos, como magnetita e maghemita, predominante em minerais facilmente intemperáveis de rochas como o diabásio. Foram coletadas amostras de duas profundidades (0-10 e 10-20 cm), o que permitiu a avaliação de amostras com valores de SM contrastantes. Adicionalmente foram coletadas e analisadas amostras de solo em pontos onde se teve um maior contraste da SM, identificados como E (eucalipto) e G (goiabeiras), localizados em área adjacente na mineradora de Porto Feliz. As amostras em geral apresentaram ampla diferença em granulometria. Foi observado maior teor de argila em E em comparação com G, porém ambas apresentaram um comportamento muito similar em relação ao teor de P no solo ($<6 \text{ mg dm}^{-3}$). Assim, mesmo com a deposição de grande quantidade de pó de diabásio na superfície do solo (estimada em 570 ton ha^{-1}) não se observou incremento no teor de fósforo disponível na camada superficial do solo.

Palavras-chave: Pó de rocha, Susceptibilidade magnética, Minerais ferromagnesianos, Fósforo disponível.

Abstract

In the state of São Paulo there are many mining companies that produce aggregates (gravel), used in civil construction and paving, which are generated from igneous rocks, such as diabase. Rocks undergo a process of comminution (fragmentation) to obtain a particulate material. In this process, a fine powder (rock powder) is produced with a granulometry varying between 2.0 and 0.2 mm, with little or no commercial use for the civil industry, which when used in the agricultural industry as an input has shown improvements. in the physical-chemical properties of soils, showing a high potential in research carried out with different cultures, among them the increase in the availability of nutrients, such as phosphorus (P). The objective of this work was to evaluate how the use of diabase powder in agriculture affects the P dynamics in the soil over time. For this, soils adjacent to three mining companies, located in the Periférica Paulista depression, in the municipalities of Piracicaba, Capivari and Porto Feliz, were evaluated, using the magnetic susceptibility record (SM - soil sensing technique) that allows the identification and quantification of ferrimagnetic minerals, such as magnetite and maghemite, predominant in easily weatherable minerals in rocks such as diabasium. Samples were collected from two depths (0-10 and 10-20 cm), which allowed the evaluation of samples with contrasting SM values. Additionally, soil samples were collected and analyzed at points where there was a greater contrast of the SM, identified as E (eucalyptus) and G (guava trees), located in an adjacent area in the Porto Feliz mining company. The samples in general showed a wide difference in granulometry. Higher clay content was observed in E compared to G, but both presented a very similar behavior in relation to the P content in the soil ($<6 \text{ mg dm}^{-3}$). Thus, even with the deposition of a large amount of diabase dust on the soil surface (estimated at 570 ton ha^{-1}) there was no increase in the available phosphorus content in the surface layer of the soil.

Keywords: Rock dust, Magnetic susceptibility, Ferromagnesian minerals, Available phosphorus.

3.1. Introdução

Para a realização deste estudo, obteve-se amostras de solo sem histórico de aplicação de fertilizantes fosfatados, porém com aplicação de pó de diabásio em longo prazo.

Para atender esta necessidade, observamos que nas mineradoras, durante os processos de cominuição e peneiramento dos britados, as partículas mais finas podem-se suspender no ar e se depositar nos solos ao redor, particularmente nos dias mais secos e com vento. Assim, procuramos solos nas adjacências de três mineradoras, com ênfase naquelas em que o sill minerado se intrudiu em rochas diferenciadas, particularmente nas rochas sedimentares. Esta situação é comum nas mineradoras localizadas na Depressão Periférica do Estado de São Paulo, onde os diques e sills minerados se intrudiram nos estratos sedimentares pré-jurássicos da Bacia do Paraná.

A deposição de pó de rocha por transporte em suspensão foi avaliada tendo como principal indicador a SM, considerando a presença significativa de minerais ferromagnesianos e magnetita no diabásio, que se expressam magneticamente. Após esta avaliação foram selecionados dois locais para caracterização. Planteasse neste capítulo objetivo de avaliar o comportamento do pó de rocha em solos que não tenham recebido aplicações de P, pelo que foram avaliados solos adjacentes a mineradoras de diabásio, onde através de evidências de campo observou se deposição de pó de rocha faz muito tempo, em solos onde não se tem nenhum uso agrícola.

3.2. Material e Métodos

3.2.1 Estudo exploratório

3.2.1.1 Localização e amostragem

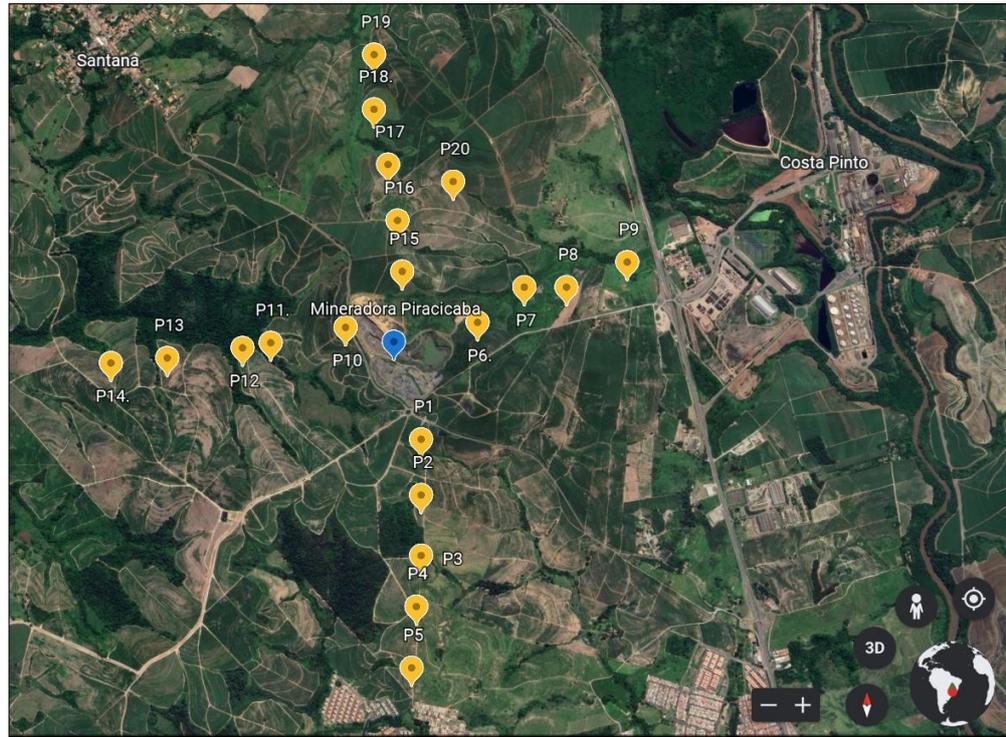
O estudo foi realizado em solos localizados no entorno de três mineradoras de diabásio, no estado de São Paulo, nos municípios de Piracicaba, Capivari e Porto Feliz (Tabela 1).

Tabela 1. – Localização das mineradoras utilizadas para coleta de amostras de solo de seu entorno.

Mineradora	Município	Localização	
		S	W
Minerpav- Quibrita	Piracicaba	22° 38' 40"	47° 42' 31"
Grupo Base-Minermix	Capivari	22° 58' 48"	47° 32' 22"
Grupo Base-Extra Base	Porto Feliz	23° 15' 04"	47° 34' 59"

Foram coletados 20 pontos de amostragem, no entorno de cada mineradora, coletando amostras simples de solo nas profundidades de 0–10 e 10–20 cm a cada 350 m, com auxílio de uma pá. Os pontos foram georreferenciados e distribuídos em 4 transectos, de acordo com a diversidade litológica presente na depressão periférica Paulista (rochas ígneas e sedimentares) e da paisagem (Figura 1).

A)



B)



Figura 1. –Georreferenciação da área de amostragem de solo em pontos adjacentes a das mineradoras de diabásio. (A) Município de Piracicaba-SP; (B) Município de Capivari- SP. Fonte: Google Earth.

3.2.1.2 Preparo das amostras de solo

As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira com malha de 2 mm, para obter Terra Fina Seca ao Ar (TFSA).

3.2.1.3 Determinação da suscetibilidade magnética (SM)

Para a determinação da suscetibilidade magnética (SM), foram utilizadas subamostras de 100 g TFSA de cada uma das amostras coletadas, para cada profundidade. As subamostras foram colocadas em placa de petri (diâmetro 90 mm) e feita a leitura da SM por unidade de massa e frequência, utilizando um susceptímetro (KT-10 v2 Terraplus, com frequência de funcionamento 10 kHz e sensibilidade de $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$) (Figura 2).



Figura 2. – Determinação da suscetibilidade magnética (SM) em subamostras de solo.

3.2.2 Estudo de área com deposição direta de pó de rocha

3.2.2.1 Localização

Para esta fase do estudo foi selecionada a área adjacente na mineradora do município de Porto Feliz (SP) a 523 m acima do nível do mar (Figura 3). Segundo a classificação de Köppen (1936) o clima da região é do tipo tropical de altitude, (Cwa) com uma precipitação pluviométrica média de 1.330 mm por ano.

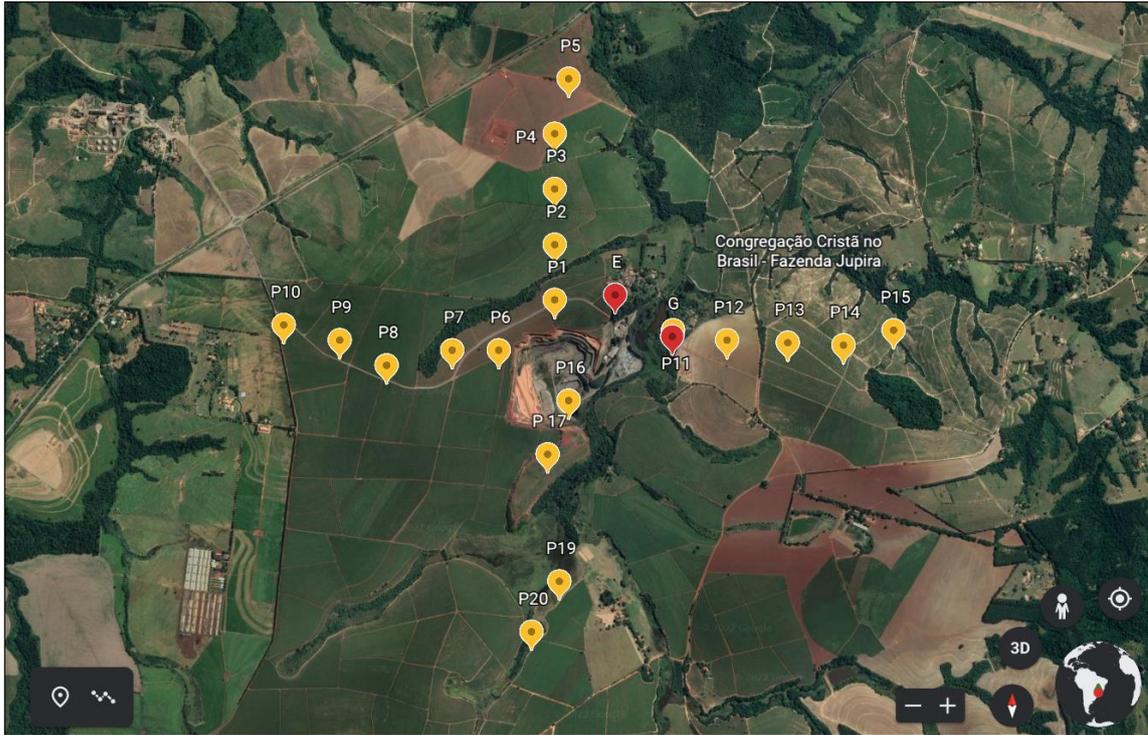


Figura 3. – Localização da área de amostragem adjacente à mineradora de diabásio, município de Porto Feliz- SP. Fonte: Google Earth.

A área experimental amostrada está inserida na depressão periférica Paulista, com predomínio de solos do tipo Latossolos Vermelho Amarelos e sedimentos associados à Formação Tatuí e Formação Tietê, com a formação rio Bonito, dominância de siltitos e diamictitos (Ross & Moroz 1997). O substrato rochoso apresenta fatores estratigráficos e tectônicos com níveis preferenciais de intrusões de diabásio como a formação Irati, o contato do Tubarão com o cristalino e a parte basal da Formação Botucatu, na figura 3 identificasse solos de diferentes cores com associações de Latossolos e Argissolos com teores muito diferentes de argila e de pó de rocha ao longo do tempo fazendo efeito muito diferente entre os solos.

3.2.2.2 Plano amostral e critério de seleção de pontos de amostragem

Foram estudadas duas profundidades devido ao contraste na SM entre as profundidades em cada ponto, para detecção de deposição de pó de rocha com minerais magnéticos transportados pela atmosfera e depositado na superfície do solo (0-10 cm) e (10-20 cm).

Adicionalmente dois pontos amostrais, adjacentes ao parque de cominuição e peneiramento da mineradora em Porto Feliz (Pontos cor vermelha Figura 3), identificados como G (goiabeira) (coincidindo com o P11 localizado 23° 14' 57"S e 47° 35' 01"W) ponto G amostrado próximo a um pomar de goibaieras área sem manejo agrícola e com presença de árvores nativas e E (eucalipto) (ponto extra localizado 23° 14' 04"S e 47° 34' 4"W) ponto amostrado com presença de eucaliptos, que se servem como barreira natural, sendo que poderiam capturar parte do pó de rocha advindo do parque de cominuição, com a possibilidade de que este material escorresse para o solo durante as chuvas. Estes locais foram amostrados nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, com 5 repetições em

cada ponto amostral. Também foram coletadas amostras até a profundidade de 100 cm, em intervalos de 20 cm, com trado, nos dois pontos (G e E) para avaliar o comportamento da SM no perfil do solo.

3.2.2.3 Caracterização do pó de diabásio

Foram coletadas três amostras de pó de rocha, com granulometria variável, menor que 2 mm, provenientes da pilha de moagem da mineradora localizada em Porto Feliz. As quais foram peneiradas a seco, as amostras correspondentes a areia fina (0,21- 0,12 mm) submetidas a moagem e passadas por peneira de 200 mesh.

As amostras foram caracterizadas quanto aos teores de óxidos por fusão por $\text{LiBO}_2/\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 1000 °C e dissolução do material em solução de ácido nítrico (4 %) mais ácido hidrocloreídrico (2%) e analisadas por ICP-OES (Tabela 2).

Tabela 2. – Teores de óxidos em porcentagem massa/massa da fonte avaliada.

Elemento (óxido)	Teor (%) (m m^{-1})
SiO_2	48,6
Fe_2O_3	15,2
Al_2O_3	13,05
CaO	9,51
MgO	5,32
Na_2O	2,34
K_2O	0,99
TiO_2	2,93
MnO	0,2
P_2O_5	0,34
BaO	0,04
SrO	0,05
LOI	1,93
Total	100

A composição mineralógica do pó de rocha foi determinada por meio da difração de raios-X em uma amostra do pó de rocha, utilizando um difratômetro (Miniflex II Deskop X-Ray Diffractometer Rigaku, 30 Kv, corrente de 20 mA) (Figura 4). O difratograma foi apresentado no relatório no modo “intensidade relativa”, no qual o reflexo de maior intensidade é assinalado como intensidade 1000 e a intensidade dos outros reflexos é atribuída proporcionalmente em relação à contagem (CPS) original. O difratograma foi interpretado com base na lista de fases candidatas geradas pela baseCOD (COD-INORG VER 189751 2017.01.03) através da interface do software Match! (Version 3.4.2. build 96, março de 2017, Crystal Impact, Germany). Também foram consultados bases de dados Brindley and Brown (1980), Moore and Reynolds, (1997).

De forma geral, a identificação mineralógica das amostras aponta reflexos de plagioclásio, clinopiroxênio (augita), magnetita/ilmenita e olivina e de um filossilicato 2:1. O filossilicato 2:1 possui espaçamento de 1.4 nm, podendo tanto ser resultado de expansão de micas já em processo de intemperização e separação das camadas.

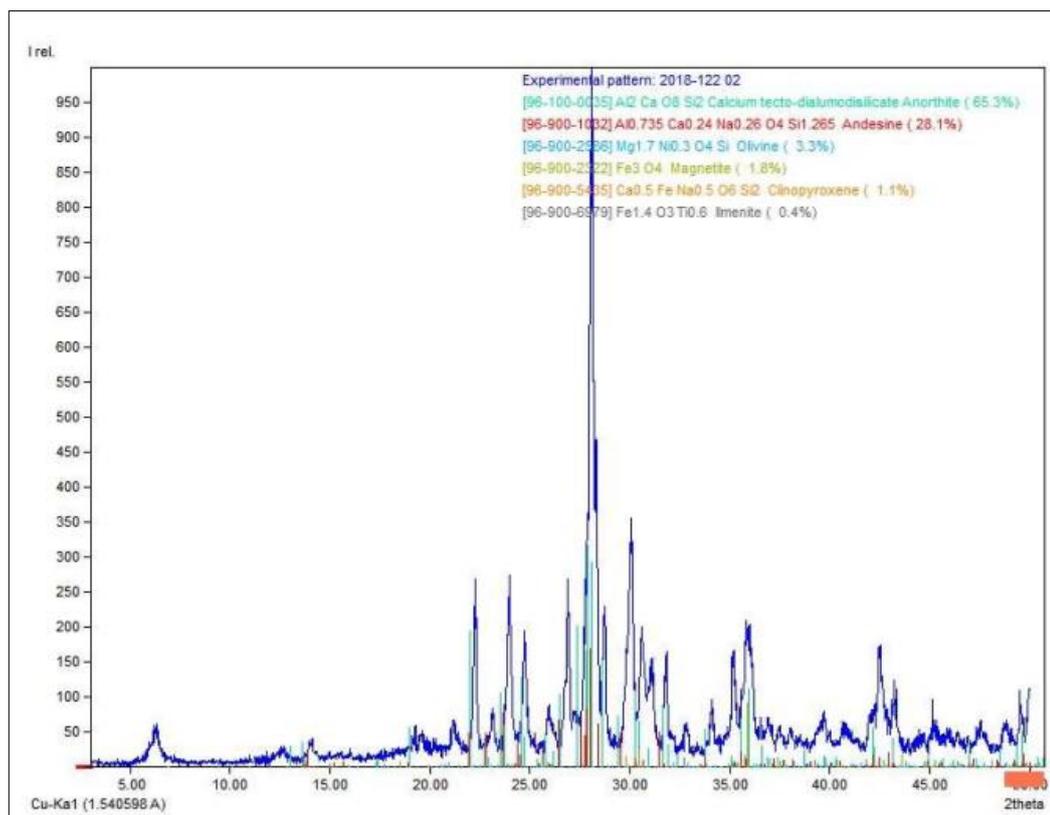


Figura 4. – Difratoograma do pó de rocha, amostra íntegra, obtida em área próxima a uma mineradora no município de Porto Feliz-SP.

3.2.2.4 Caracterização dos solos

3.2.2.4.1 Caracterização granulométrica e química

Amostras de TFSA foram submetidas a análises de acordo com o manual de métodos de análise química do Instituto Agrônomo de Campinas (Camargo et al., 2009) e do manual de métodos de análises de solo da EMBRAPA (Teixeira et al., 2017). Os valores de granulometria foram obtidos pelo método proposto por Silva et al. (2017). Os valores de pH foram determinados em água e KCl 1 mol L⁻¹. A matéria orgânica (MO) foi determinada por oxidação do carbono por íons de dicromato, em meio fortemente ácido. Os teores de Na⁺, K⁺ trocáveis e P disponíveis foram extraídos por Mehlich I (Mehlich, 1978) e também por meio da resina de trocadora de ânions (RTA) (Raij et al., 1986). Os teores de Na⁺ e K⁺ foram determinados por fotometria de emissão de chama. Os teores de P foram determinados por espectroscopia (Murphy e Riley, 1962). AAS, Os teores de Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ foram extraídos com uso de KCl 1 mol L⁻¹ e determinação volumétrica com solução diluída de NaOH. A acidez potencial trocável (Al³⁺ e H⁺) foi obtida com o extrator acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ (tamponado em pH de 7,0). A soma de bases trocáveis (S) foi representada pelo somatório das concentrações trocáveis de Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ trocáveis (S = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺). A capacidade de troca de cátions em pH 7 (CTC) foi estimada pela somatória de S e Al³⁺+H⁺ (CTC = S+(Al³⁺+H⁺)). A percentagem de saturação por bases (V%) foi estimada por V% = 100 * (S / S + H + Al). A percentagem de saturação por alumínio (m%) e foi estimada por m% = 100 * (Al / S+Al).

3.2.2.5 Determinação dos teores de Fe e Al cristalinos (Fe_{DCB} e Al_{DCB}) e teores de Fe e Al de baixa cristalinidade (Fe_{ox} e Al_{ox})

As formas cristalinas dos óxidos de Fe foram extraídas com solução de ditionito-citrato- bicarbonato de sódio – DCB (Mehra & Jackson, 1960). Para isso, pesou-se 0,5 g TFSA em tubos falcon (50 mL) e foram adicionados 2,5 mL de H_2O_2 a 30%. As amostras foram mantidas em banho-maria a 40°C por 24 h. Esta etapa teve por objetivo a eliminação da matéria orgânica, que tem forte interação com os óxidos de Fe e de Al. Após 24 h, foram adicionados 20 ml de citrato de sódio 0,3 mol L⁻¹ e 2,5 mL de $NaHCO_3$ 1,0 mol L⁻¹ e em seguida agitou-se e aqueceu-se a 80°C em banho-maria. Quando a suspensão atingiu a temperatura de xx °C, foi adicionado 0,5 g de ditionito de sódio e agitou-se vigorosamente com bastão de vidro por 1 min, mantendo o aquecimento a esta temperatura por 1 h. Na sequência adicionou-se novamente 0,5 g de ditionito de sódio, mantendo o conjunto sob aquecimento e agitação. Solos com elevado teor de óxidos exigiram a adição extra de ditionito de sódio, espaçadas de 30 minutos cada um, sob mesma temperatura. Após, foram adicionados 5 mL de uma solução de cloreto de sódio saturada, misturou-se bem, deixou-se em repouso por uma hora e centrifugou-se por 20 min a 200 rpm. Em seguida, completou-se o volume do sobrenadante das soluções para 100 mL, com auxílio de balões volumétricos. Após, os resíduos das amostras foram lavados duas vezes com 25 mL de $NaCl$ 0,5 mol L⁻¹, centrifugando e coletando o sobrenadante no balão de 100 mL. Depois das duas lavagens, completou-se o volume para com água ultrapura. Os teores de Fe e de Al foram determinados por espectrofotometria de emissão óptica por plasma acoplado (ICP-OES).

As formas de baixa cristalinidade de Fe e Al foram extraídas com solução de oxalato de amônio-OX, na ausência de luz. A solução de oxalato de amônio foi preparada utilizando solução de ácido oxálico 0,1 mol L⁻¹ + oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ a pH 3 (Schoumans, 2009), na ausência de luz evitando a redução fotoquímica do Fe^{3+} para Fe^{2+} . Foram adicionados 40 mL da solução a 0,4 g de TSFA, em tubos Falcon (50 mL) devidamente protegidos da luz (encapsulados em papel alumínio). A suspensão foi equilibrada por 2 h no escuro, com agitação contínua utilizando um agitador horizontal a 180 rpm. O extrato foi centrifugado a 1.844 g por 15 min. Na sequência, 5 mL do sobrenadante foram adicionados em tubos de polietileno de 50 mL com 20 ml de HCl 0,01 mol L⁻¹ para conservação do extrato. A quantificação foi feita por espectrofotometria de emissão óptica por plasma acoplado (ICP-OES)

3.2.2.6. Determinação da Suscetibilidade Magnética (SM)

A determinação da SM seguiu a metodologia descrita no ponto 2.2.1.3.

3.2.2.7. Curva de calibração de adição de pó de rocha

Uma amostra composta de solo do horizonte B de um Latossolo Vermelho Amarelo (SiBCS; EMBRAPA, 2018) foi coletada num local distante 1,8 km da mineradora, sem influência de deposição de pó de rocha (localizado 23°14'11" S, 47°35'32" W) no município de Porto Feliz-SP. Adicionalmente, amostras de pó de rocha foram coletadas na pilha de moagem dentro da mineradora. As amostras foram preparadas como TFSA. Com estes materiais, foram feitas as curvas de calibração de solo mais adição de pó de rocha para sete pontos, utilizando 100 g

de TFSA e adições de: 0 (sem pó de rocha), 5, 10, 25, 50, 75 e 100 % (m m^{-1}) de pó de rocha. Após foi medidas a suscetibilidade magnética da curva, com cinco repetições de leituras para cada ponto.

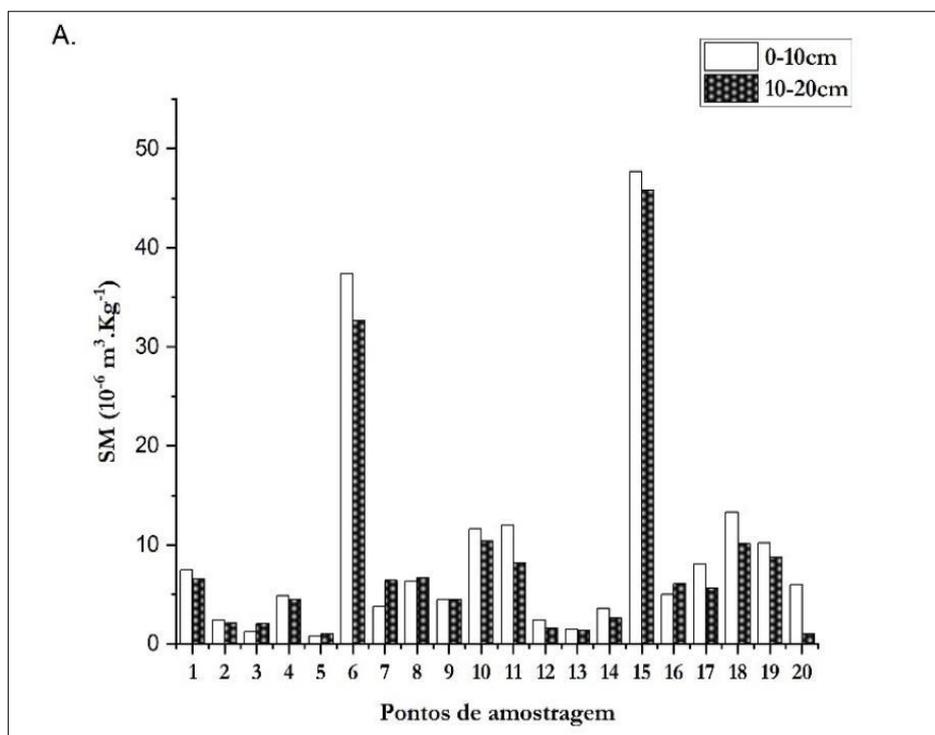
3.2.3 Análise estatística

Os dados foram analisados utilizando estatística descritiva, calculando-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Os dados da suscetibilidade das amostras e da curva foram submetidos à análise de variância e avaliados por meio de contrastes ortogonais ao nível de 5% de significância.

3.3. Resultados e Discussão

3.3.1 Suscetibilidade magnética (SM) nos locais selecionados na fase exploratória

Observou-se a presença de muitos detritos na área adjacente à mineradora localizada em Piracicaba, além de adição e movimentação do solo por erosão em sulcos nos primeiros 20 cm do solo. As amostras de solo deste local tiveram SM em geral abaixo de $15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (Figura 5A) e por isso não foram consideradas para a continuidade deste trabalho.



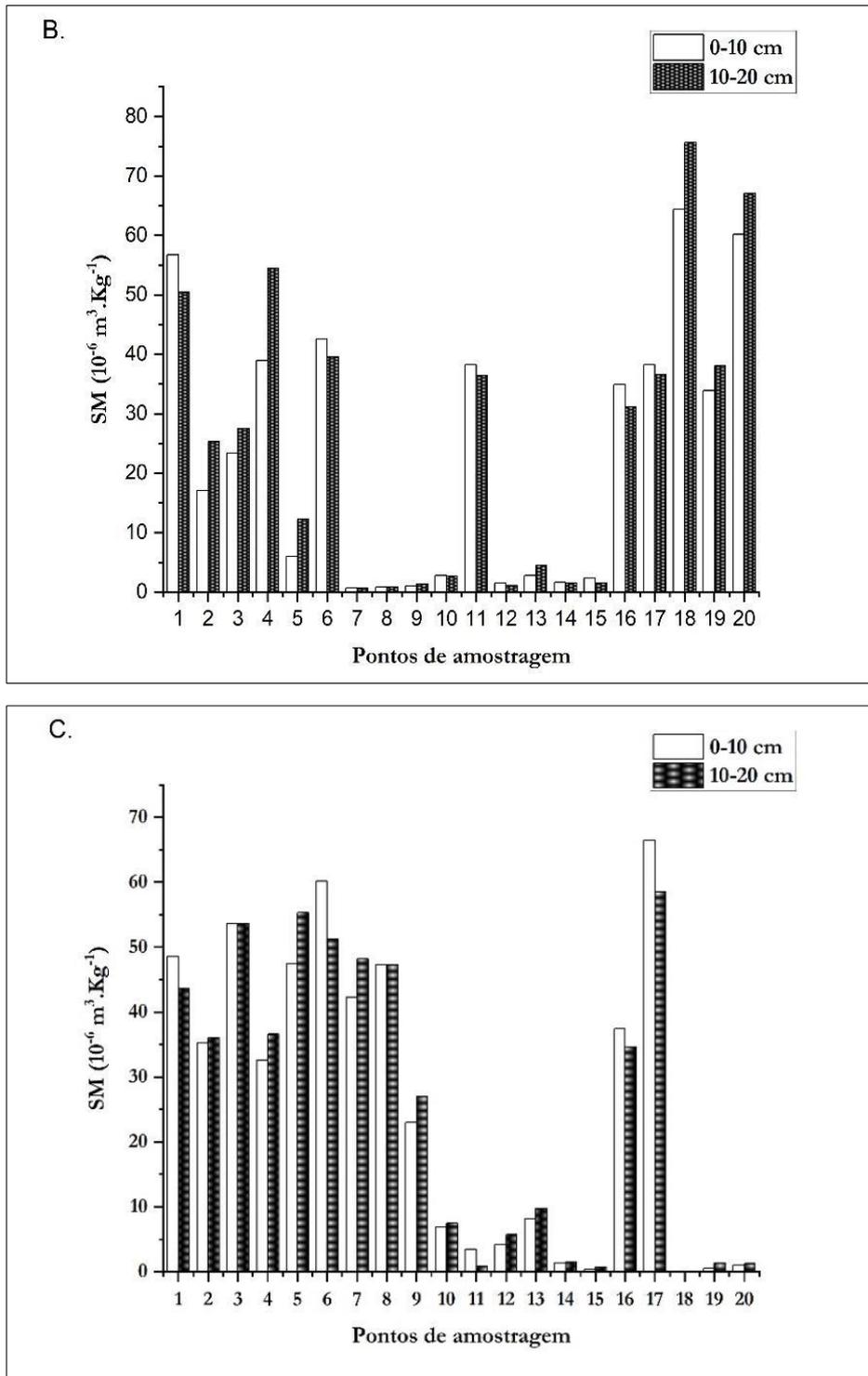


Figura 5. – Teores de suscetibilidade magnética, para cada ponto de amostragem, na profundidade de 0-10 cm e 10-20 cm. (A) Piracicaba, (B) Capivari, (C) Porto Feliz.

Nos pontos amostrados na área adjacente às mineradoras localizadas em Capivari e Porto Feliz, foi observado que para ambos os locais as amostras coletadas nos pontos P1, P6, P11, P16 e P17, que ficam no entorno das mineradoras, na profundidade de 0-10 cm, tiveram uma SM superior comparado aos demais pontos, mais afastados das mineradoras e com a profundidade de 10-20 cm. Este resultado sugere que o pó de rocha que está sendo depositado no solo não tem um grande alcance de transporte, ficando em curta distância em torno da

mineradora e que não se desloca no perfil do solo, ficando concentrado na superfície do solo. Ao comparar e avaliar estes pontos amostrados em cada um dos municípios, para Capivari não se teve um gradiente tão considerável em SM, pelo que se considerou continuar com o trabalho só com pontos localizados em Porto Feliz.

3.3.2 Caracterização granulométrica e química para os pontos E e G, Porto Feliz-SP

Os solos dos pontos E e G, de forma geral, apresentaram caráter ácido ao se analisar os valores de pH em água com valores de média menores a 5,7 e coeficiente de variação relativamente baixos (Tabela 3).

Apesar do local E apresentar maior conteúdo de argila que o ponto G devido a diferenças em seu material de origem, evidencia-se que os teores de P extraídos pelos métodos Mehlich 1 e Resina (Tabela 3) apresentaram, de maneira geral, o mesmo teor para ambos os pontos, sendo maior em superfície que em profundidade. Os teores de P disponível das amostras analisadas, consideram-se baixos por tratar-se de uma área não agrícola, e, portanto, sem a aplicação de fertilizantes fosfatados.

Ao comparar os métodos de extração de P, Mehlich 1 utiliza soluções de caráter ácido (com pH em torno de 2,0), o que favorece os desequilíbrios das formas mais disponíveis de P no solo, extraindo mais P em relação ao método da resina, que extrai o P por troca iônica, e, portanto, remove menos P em solos arenosos e mais em solos argilosos.

Tabela 3. – Teores médios de parâmetros químicos e granulométricos do solo a 0-10 cm e 10-20 cm de profundidade. Médias das determinações em 5 amostras para cada local amostrado Porto Feliz- SP.

Local	Profundidade cm	MO	pH	pH	P(Meh-1)	P(Res)	SB	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V(1)	m ⁽²⁾
		g kg ⁻¹	H ₂ O	KCl	-----mg dm ⁻³ ----		----- mmolc dm ⁻³ -----						----- % -----		
E	0 - 10	22,3	5,7	4,8	6,0	4,7	38,9	2,1	28,2	8,6	2,4	75,4	114,2	33,7	6,0
	10 - 20	17,5	5,5	4,7	2,9	2,3	35,8	2,6	23,7	9,5	4,2	80,1	115,9	30,9	10,5
	CV(%)	19	6	6	49	37	18	27	23	21	30	9	9	13	32
G	0 - 10	18,8	5,2	4,5	5,7	4,5	24,9	1,5	14,6	8,8	2,9	73,8	98,7	25,0	11,4
	10 - 20	13,9	5,2	4,4	3,4	2,1	17,7	1,0	10,8	5,9	4,4	77,4	95,1	18,2	21,8
	CV(%)	29	3	4	40	39	36	46	36	36	36	5	8	30	53

Local	Profundidade cm	Argila		Silte		Areia	
		----- % -----					
E	0 - 10	60		24		20	
	10 - 20	59		22		23	
	CV(%)	8		58		29	
G	0 - 10	8		23		69	
	10 - 20	10		16		74	
	CV(%)	19		38		10	

(1) Saturação por bases (2) Saturação por Alumínio

3.3.3 Teores de Fe_{DCB} , Al_{DCB} e Fe_{OX} , Al_{OX} para os pontos E e G, Porto Feliz-SP

Os valores apresentados na tabela 5 quantificam os teores de óxidos de Fe e Al (cristalinos e de baixa cristalinidade). Teores de Fe e Al extraídos com DCB, foram maiores nas amostras do ponto E comparado ao G, evidenciando diferenças existentes no material de origem dos solos. Amostras do ponto E apresentam valores mais altos de Fe_{DCB} , solo desenvolvido a partir de material de origem basalto, com maior conteúdo de Fe. A maior quantidade de Fe_{DCB} em 0-10 cm pode ser devido à contribuição do Fe da estrutura dos minerais primários como depositados pelo pó de rocha (Melo et al., 2012). Este fato também corrobora na maior leitura de SM (Figura 6) na profundidade de 0-10 cm. Para os solos ponto G desenvolvidos a partir de material sedimentar, os teores de Fe e Al foram menores, tendo maior presença de areia.

Nos solos dos dois pontos estudados a relação Fe_{OX}/Fe_{DCB} foi baixa (Tabela 4), indicando o predomínio de formas mais cristalinas em ambos solos.

Tabela 4. – Teores médios de Fe e Al extraídos com DCB (Fe_{DCB} e Al_{DCB}) ditionito citrato bicarbonato e oxalato de amônio-OX (Fe_{OX} e Al_{OX}) e sua razão. Nas profundidades 0-10 cm e 10-20 cm, para as 5 repetições coletadas, em cada local amostrado Porto Feliz – SP.

Local	Profundidade cm	Fe_{DCB}	Al_{DCB}	Fe_{OX}	Al_{OX}	Fe_{OX}/Fe_{DCB}	Al_{OX}/Al_{DCB}
		-----g kg ⁻¹ -----				-----%-----	
E	0 - 10	123,77	10,53	5,48	4,72	0,04	0,45
	10 - 20	108,60	10,57	5,28	5,00	0,04	0,48
	CV(%)	13	10	35	31	28	31
G	0 - 10	5,75	2,50	1,84	0,90	0,34	0,37
	10 - 20	5,59	4,01	1,92	0,86	0,35	0,22
	CV(%)	27	28	39	22	34	46

3.3.4 Caracterização química para o perfil do solo de cada local

De forma geral evidencia-se na tabela 5, teores mais altos de nutrientes no local E, comparado ao G, sendo mais alto em superfície e diminuindo a maior profundidade.

As formas de P e a variabilidade dos teores de P, ao longo do perfil foram bastante influenciadas pelos processos pedogenéticos (Cassagne et al., 2000).

Tabela 5. – Resultados de parâmetros químicos em diferentes profundidades do perfil, para cada local amostrado E e G adjacente à mineradora Porto Feliz – SP.

Profundidade	MO	pH	pH	P(Meh-1)	K	Ca	Mg	SB	Al	H+Al	CTC	V(1)	m (2)
cm	g kg ⁻¹	H ₂ O	KCl	mg dm ⁻³		----- mmolc dm ⁻³ -----					----- % -----		
Local de amostragem E													
0 - 20	22,3	6,3	5,2	6,0	4,5	31,8	14,7	51,0	1,8	82,0	133,0	38,3	3,3
20 - 40	17,5	6,0	4,8	3,7	1,5	25,7	9,0	36,2	1,3	39,6	75,8	47,7	3,3
40 - 60	18,8	6,0	5,0	5,8	1,0	35,6	11,4	48,0	1,5	77,6	125,6	38,2	3,0
60 - 80	9,7	6,4	5,5	3,9	1,9	34,1	10,5	46,6	0,8	57,4	104,0	44,8	1,6
80 - 100	2,8	6,6	5,4	1,7	3,2	27,4	9,5	40,2	1,0	56,0	96,2	41,8	2,4
Local de amostragem G													
0 - 20	5,3	5,6	4,9	5,6	1,5	13,6	6,6	21,7	1,0	66,6	88,3	24,6	4,4
20 - 40	7,6	5,3	4,4	5,1	1,5	15,0	8,1	24,5	3,5	73,8	98,3	24,9	12,5
40 - 60	7,9	5,3	4,2	1,5	1,0	15,4	7,4	23,8	7,5	78,2	102,0	23,3	24,0
60 - 80	4,6	5,4	4,2	1,0	0,8	8,7	4,6	14,1	8,0	78,8	92,9	15,2	36,1
80 - 100	2,5	5,5	4,2	0,8	0,8	8,4	5,3	17,5	10,0	74,6	92,1	19,0	36,4

(1) Saturação por bases (2) Saturação por Alumínio

Respeito nos teores de Fe_2O_3 , estes foram maiores em aqueles associados a minerais de Fe mais cristalinos (DCB) no ponto E (Tabela 6) respeito a G, a quantidade de material menos cristalino extraído pelo OA foi baixa. Além disso foi maior em superfície, respeito na profundidade do perfil. Essa amplitude evidencia-as diferenças existentes no material de origem dos solos. Os maiores teores foram para os solos desenvolvidos de basalto (local E).

Tabela 6. –Resultados de Fe e Al extraídos com oxalato de amônio (Fe_{ox} e Al_{ox}) com ditionito citrato bicarbonato (Fe_{DCB} e Al_{DCB}) e relação entre os óxidos em diferentes profundidades do perfil, para cada dois pontos amostrado E* e G adjacente à mineradora Porto Feliz – SP.

Profundidade	Fe_{DCB}	Al_{DCB}	Fe_{ox}	Al_{ox}	$\text{Fe}_{\text{ox}}/\text{Fe}_{\text{DCB}}$	$\text{Al}_{\text{ox}}/\text{Al}_{\text{DCB}}$
cm	-----g kg ⁻¹ -----			-----%-----		
Local de amostragem E						
0 - 20	134,9	11,4	5,4	5,0	0,0	0,4
20 - 40	129,5	10,7	5,7	5,2	0,0	0,5
40 - 60	116,2	9,5	7,7	5,1	0,1	0,5
60 - 80	82,9	8,7	4,0	2,7	0,0	0,3
80 - 100	81,8	11,5	2,8	2,4	0,0	0,2
Local de amostragem G						
0 - 20	13,3	1,7	0,7	0,5	0,1	0,3
20 - 40	7,3	2,2	1,1	1,1	0,2	0,5
40 - 60	8,3	3,3	1,8	1,4	0,2	0,4
60 - 80	4,6	2,5	1,5	1,4	0,3	0,6
80 - 100	6,6	3,0	1,2	0,9	0,2	0,3

E: ponto próximo a plantação de eucalipto

G: ponto próximo a plantação de goiaba

3.3.5 Susceptibilidade magnética (SM) nas amostras E e G Porto Feliz-SP

Nos pontos E e G, foi observado que a SM variou em função do material mineral presente em cada profundidade avaliada do solo, onde foram evidenciados maiores valores de SM na profundidade de 0 – 10 cm em relação à profundidade de 10 – 20 cm (Figura 6).

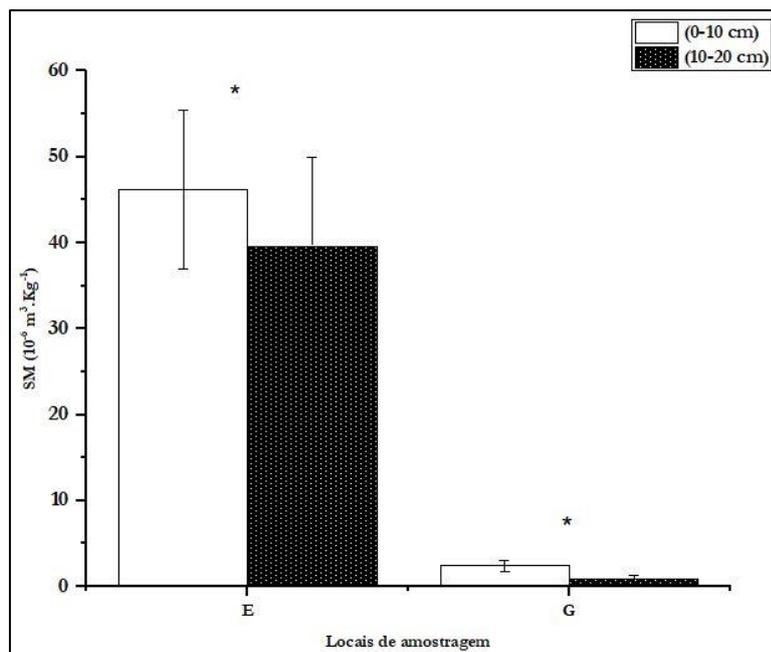


Figura 6. – Teores médios de susceptibilidade magnética (SM), em cada profundidade nos locais estudados, significativo (*) e não significativo (ns) por contrastes ortogonais a 5% de probabilidade ($< 0,05$).

No ponto E houve um incremento de $6,48 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ na SM da profundidade 0-10 cm em relação a profundidade 10-20 cm. Os valores de SM apresentaram estreita relação com os teores de Fe no solo devido a presença de minerais ferrimagnéticos, como maghemita e magnetita nas amostras analisadas. O que pode ser influenciado pela magnetita litogênica do pó de rocha que tem uma alta influência na expressão magnética. Solos com presença de minerais de rochas ígneas básicas são geralmente caracterizados por níveis elevados de óxidos-Fe (Silva et al., 2010; Camelo et al., 2018; Silva et al., 2020). Este incremento pode estar relacionado com o aporte de minerais ferromagnéticos pela deposição de poeira de diabásio no solo da mineradora.

Nos perfis de solo avaliados para cada ponto observou-se que a SM variou em função do seu respectivo material parental e teores de Fe. A maior expressão ocorreu em superfície e diminuiu com a profundidade (Tabela 7). Nestes solos, a contribuição da deposição de pó de diabásio na superfície também deve ter ocorrido, dada sua proximidade com os pontos amostrados apenas em superfície.

Tabela 7. – Teor SM, no perfil coletado a diferentes profundidades para cada ponto de amostragem.

Profundidade	Susceptibilidade Magnética - SM	
	(10 ⁻⁶ m ³ kg ⁻¹)	
cm	E	G
0-20	48,7	4,45
20-40	39,1	1,65
40-60	31,4	0,82
60-80	23,9	0,48
80-100	19,2	0,27

3.3.6 Curva de calibração de adição de pó de rocha

Na curva de calibração para o horizonte B do Latossolo Vermelho Amarelo a diferentes doses de pó de rocha. O modelo linear foi significativo e ajustado ao comportamento da SM (Figura 7).

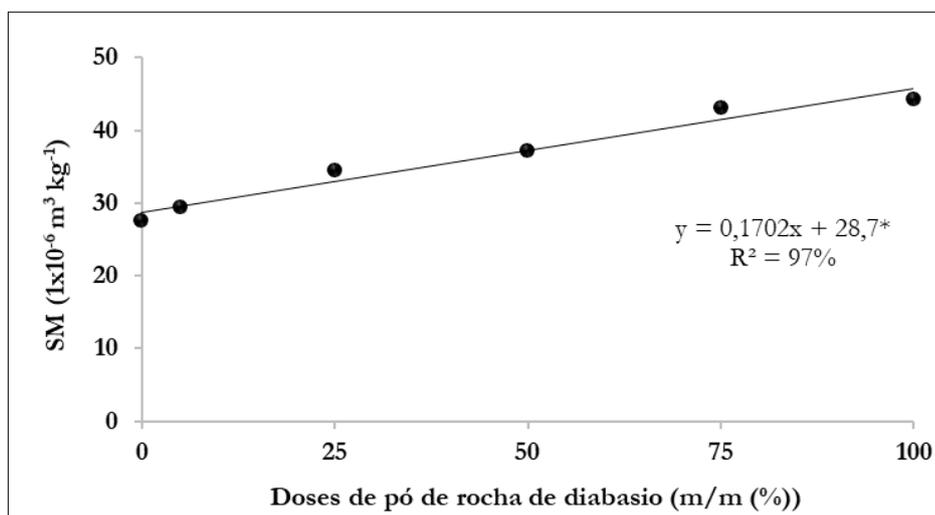


Figura 7. –Valores de susceptibilidade magnética em relação a doses crescentes de pó de rocha de diabásio no solo.

O modelo indica que a cada 1% de aumento na dose de pó de rocha corresponde a um aumento de $0,1702 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ no valor da SM, para a matriz de solo basáltica. Aplicando o coeficiente angular do modelo de regressão obtido ao aumento na SM no solo do ponto E, também de matriz basáltica ($46,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} - 39,7 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} = 6,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) resulta na estimativa de 38% de deposição de pó de rocha (Figura 6). O valor de 38% é elevado e equivale a uma entrada de P_2O_5 a taxa de 570 t ha^{-1} para o ponto E. Isto pode estar relacionado com o funcionamento de pelo menos 30 anos do parque de cominuição (<https://extrabase.com.br>), que em média (estimada) poderia estar adicionando cerca de $19 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de material ao ponto E.

3.4. Conclusões

- Foi possível identificar grande quantidade (estimada) de pó de rocha depositada no solo por meio do uso da susceptibilidade magnética.
- Mesmo com a estimativa de deposição que demonstra um acumulado de cerca de 30 anos de grande quantidade de pó de diabásio na superfície do solo (estimada em 570 t ha^{-1}) não se obteve um incremento no teor de (P-Disp) na camada superficial do solo, que corresponde ao local onde se tem maior deposição.

Referências

- Brindley, G. W. and Brown, G. 1980. Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Mineralogical Society Monograph No. 5, London. 495 p.
- Camargo, O.A.; Moniz, A.C.; Jorge, J.A.; Valadares, J.M.A.S. 2009. Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, Instituto Agronômico. 77 p. (Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada).
- Camêlo, D.L.; Ker, J.C.; Fontes, M.P.F.; Costa, A.C.S.; Corrêa, M.M.; Leopold, M. 2018. Mineralogy, magnetic susceptibility and geochemistry of Fe-rich Oxisols developed from several parent materials. *Scientia Agricola* 75:410–419 p.
- Cassagne N.; Remaury, M.; Gauquelin, T.; Fabre, A. 2000. Forms and profile distribution of soil phosphorus in alpine Inceptisols and Spodosols (Pyrenees, France), *Geoderma*, Volume 95, Issues 1–2, 161-172 p.
- EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5ª. Santos, H.G. Dos.; Jacomine, P.K.T.; Anjos, L.H.C. Dos.; Oliveira, V.A. DE.; Lumbrreras, J.F.; Coelho, M.R.; Almeida, J.A. DE.; Araujo Filho, J.C. De.; Oliveira, J.B. De.; Cunha, T. J. F. organizadores. Rio de Janeiro: EMBRAPA; 2018.
- Köppen, W. 1936. Das geographische System der Klimate. In: Köppen W, Geiger R (eds) *Handbuch der Klimatologie*. Gebrüder Borntraeger, Berlin, p 1–44.
- Mehlich, A. 1978. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.9, n.6, p.477-492.
- Mehra, O.P. and Jackson, M.L. 1960. Iron Oxide Removal from Soils and Clay by a Dithionite-Citrate System Buffered with Sodium Bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 7, p.317-327.
- Melo, V.F.; Uchôa, S.C.P.; Dias, F.O.; Barbosa, G.F. 2012. Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. *Actaamazônica*, Manaus, v. 42, p. 471-476.
- Moore, D. M.; Reynolds, R. C. 1997. X ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press, 378p.
- Murphy, J. & Riley, J.P. A.1962. modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 26, p.31-36.
- Raij, B. van; Quaggio, J.A.; Silva, N.M. da. 1986. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.17, n.5, p.547-566.

Ross, J.L.S. & Moroz, I.C. 1997, Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo, IPT / FAPESP, São Paulo, escala 1:500.000, 2v.

Schoumans, O. F. 2009. Determination of the degree of phosphate saturation in noncalcareous soils. In J. L. Kovar & G. M. Pierzynski (Eds.), *Methods for phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and water* (2nd ed., pp. 29–32). SERA 17 Bulletin 408. Blacksburg: Virginia Tech. Retrieved from <https://sera17dotorg.files.wordpress.com/2015/02/sera-17-methods-for-p-2009.pdf>.

Silva, A.R.; Souza, J. I.G.; Costa, A.C.S. 2010. Magnetic susceptibility of B horizon of soils in the state of Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34: 329-337.

Silva, R. C.; Cury, M. E.; Ieda, J. J. C.; Sermarini, R. A.; Azevedo, A. C. Chemical attributes of a remineralized Oxisol. *Ciência Rural*, v. 47, n. 11, nov. 2017. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160982>

Silva, L.S.; Marques, J. J.; Barrón, V.; Gomes, R.P.; Teixeira, D.D.B.; Siqueira, D.S.; Vasconcelos, V. 2020 Spatial variability of iron oxides in soils from Brazilian sandstone and basalt. *Catena* 185:1-10.

Teixeira, P.C.; Donagema, G.K.; Fontana, A. & Teixeira, W.G. 2017. *Manual de métodos de análise do solo*. 3. ed. Brasília: Embrapa, 573 p.

4. AMOSTRAS DE SOLO COM APLICAÇÃO DE PÓ DE DIABÁSIO E COM FERTILIZAÇÃO FOSFATADA.

Resumo

A aplicação de pó de rocha no solo é uma prática que através dos anos tem ganhado muita importância na atividade agrícola, devido aos resultados positivos no solo, principalmente nas melhorias de aspectos físicos e nutricionais. Na Bacia do Paraná, a produção de agregados é extensa sobre os materiais oriundos da Formação Serra Geral, rica em rochas ígneas como basalto e diabásio. Estas rochas apresentam minerais que são ricos em Fe e Al em sua constituição, além de cátions básicos que podem auxiliar na nutrição de plantas, entretanto o teor de fosfatos naturais nestas rochas é muito baixo, não ultrapassando 1%. Porém, estudos anteriores mostraram um incremento na disponibilidade de P com a aplicação de pó de rochas ígneas. Sendo assim, compreender o comportamento do P após aplicação de pó de rocha no solo de diabásio é de extrema importância, pois o assunto ainda é pouco entendido e pode auxiliar no manejo mais sustentável de fertilizações fosfatadas na agricultura. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de pó de rocha de diabásio no teor de P disponível. Para isso, foram trabalhadas amostras de solo de um experimento a campo com milho, iniciado em 2012, em uma fazenda comercial, na cidade de Pirassununga – SP, sobre um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura franco argilo-arenosa, onde foram utilizados dois tratamentos: i) controle (S): solo sem aplicação de pó de rocha e com o mesmo manejo agrícola de aplicações de fontes fosfatadas.; e ii) GEX: solo com aplicação de 19 Mg ha⁻¹ de pó de rocha de diabásio em superfície do solo agrícola. O experimento teve duração de 5 anos. No final do experimento, amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0- 5 cm analisadas quanto ao teor de P disponível obtido pelos métodos de extração com Resina e Mehlich 1. Os resultados mostraram um incremento de cerca de 2.5 vezes no teor de P disponível no GEX em comparação com o controle. Ao avaliar as fontes que aportaram P nos diferentes tratamentos, constata-se que no tratamento GEX pode acontecer um efeito do pó de rocha que levou a uma maior liberação de P, já que estudos tem demonstrado que a apatita tem baixa taxa de dissolução no solo e assim baixa liberação do P, pelo que ao ter em conta o baixo conteúdo do P presente no pó de rocha e a baixa dissolução alguma outra situação pode estar acontecendo, pelo que é necessário avaliar a dinâmica do P em cada tratamento.

Palavras-chave: Pó de rocha de diabásio, Cristalinidade, Fósforo disponível, Taxa de dissolução.

Abstract

The application of rock dust in the soil is a practice that over the years has gained much importance in agricultural activity, due to the positive results in the soil, mainly in the improvements of physical and nutritional aspects. In the Paraná Basin, the production of aggregates is extensive on materials from the Serra Geral Formation, rich in igneous rocks such as basalt and diabase. These rocks have minerals that are rich in Fe and Al in their constitution, in addition to basic cations that can help in the nutrition of plants, however the content of natural phosphates in these rocks is very low, not exceeding 1%. However, previous studies have shown an increase in P availability with the application of igneous rock dust. Therefore, understanding the behavior of P after the application of rock dust in diabasium soil is extremely important, as the subject is still poorly understood and can help in the more sustainable management of phosphate fertilizers in agriculture. The objective of this work was to evaluate the effect of the application of diabasium rock powder on the available P content. For this, soil samples from a field experiment with corn, started in 2012, on a commercial farm, in the city of Pirassununga - SP, were worked on a Red-Yellow Latosol with sandy-clay loam texture, where two treatments were used: i) control (S): soil without application of rock dust and with the same agricultural management of applications of phosphate sources.; and ii) GEX: soil with application of 19 Mg ha⁻¹ of diabasium rock dust on the surface of the agricultural soil. The experiment lasted 5 years. At the end of the experiment, soil samples were collected at a depth of 0-5 cm and analyzed for the available P content obtained by the Resin and Mehlich 1 extraction methods. The results showed an increment of about 2.5 times in the available P content in the GEX compared to the control. When evaluating the sources that contributed P in the different treatments, it appears that in the GEX treatment an effect of rock dust may occur that led to a greater release of P, since studies have shown that apatite has a low rate of dissolution in the soil and thus low release of P, so taking into account the low content of P present in the rock dust and the low dissolution, some other situation may be happening, so it is necessary to evaluate the dynamics of P in each treatment.

Keywords: Diabase rock powder, Crystallinity, Available phosphorus, Dissolution rate.

4.1. Introdução

Este capítulo apresenta os resultados obtidos em amostras de solo coletadas em um experimento realizado entre os anos 2012 a 2015, no município de Pirassununga-SP. A área agrícola foi manejada com fertilizantes fosfatados anterior e concomitantemente à aplicação de pó de diabásio, e foi observado um grande incremento no (P-Disp) no solo. Devido a limitada possibilidade de que este aumento de P seja devido exclusivamente ao aporte de P pela dissolução da apatita do diabásio, foi considerada a hipótese de que a origem (parcial ou total) deste aumento foi a transferência do fósforo não disponível (Legacy P) para o estado de fósforo disponível. Para testar esta hipótese, foram avaliadas amostras de solo de dois tratamentos coletadas no final do experimento, uma com aplicação de pó de rocha GEX e um controle sem aplicação de pó de rocha S.

4.2. Material e Métodos

4.2.1 Instalação e condução do experimento

Foi conduzido um experimento a campo, entre os anos 2012 e 2015, no município de Pirassununga-SP, nas coordenadas 21°58'53,6" S e 47°22'44" W, com altitude 604,5 m. Pirassununga se localiza na Depressão do Mogi Guaçu, que é uma subunidade morfoestrutural da Depressão Periférica Paulista, a qual se encontra entre as cuestas basálticas e as elevações cristalinas do Planalto Atlântico. De acordo com a classificação de Koppen (Alvares et al., 2013), o clima predominante da região é do tipo Cwa, que se caracteriza com um inverno seco e verão quente e chuvoso. No período em que foi realizado o experimento houve uma seca atípica no ano de 2013 que atingiu o estado de São Paulo, tendo influência no desenvolvimento do experimento (Silva et al., 2017).

Previamente à implementação do experimento, a área experimental estava sendo cultivada com maracujá (*Passiflora edulis* S.). A implantação do experimento se deu no ano 2012, quando foi aplicado 4 Mg ha⁻¹ de pó de rocha de diabásio em superfície e foi feita a semeadura de milho (*Zea mays* L.) em sistema de plantio direto. No final do ano de 2013, após a colheita do milho, foram aplicados 15 Mg ha⁻¹ da mesma fonte de pó de rocha de diabásio na área, totalizando 19 Mg ha⁻¹ pó de rocha de diabásio aplicado. As culturas subsequentes foram milho (Dekalb Var. DKB 310 VTPro2, com aplicação de fertilizante NPK (20-05-19) na dose de 380 kg ha⁻¹) e após o término do ciclo do milho, foi cultivada aveia preta (*Avena strigosa* S.) como cobertura verde, sem adição de fertilizantes. Logo após, a área permaneceu em pousio até o final de 2014, quando se realizou uma nova semeadura de milho da mesma variedade descrita anteriormente, com aplicação de fertilizante NPK (08-24-12) na dose de 350 kg ha⁻¹, e cujo ciclo finalizou no abril de 2015 (Figura 8).

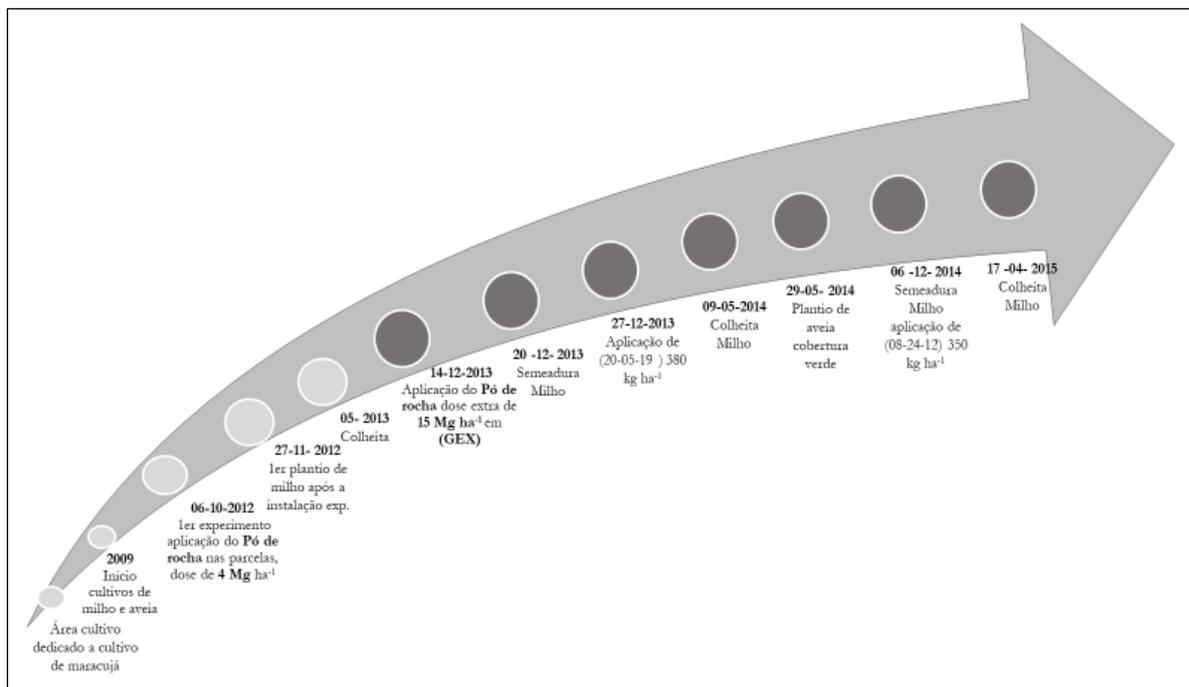


Figura 8. – Histórico do manejo da área experimental de Pirassununga (2009-2015).

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, onde foram avaliados dois tratamentos com cinco repetições, totalizando 10 unidades experimentais (parcelas). O tamanho das parcelas foi de 12 x 20 m, totalizando uma área de 240 m² por parcela. Os tratamentos avaliados corresponderam à: i) (GEX); ii) controle sem pó de rocha (S).

4.2.2 Caracterização do pó de diabásio

O material utilizado no experimento consistiu em um subproduto obtido do processo de moagem da rocha coletado no sill de Limeira (SP) proveniente da pedreira Cavinatto Ltda, situada no (22°36'31.2" S; 47°21'45.7" W) o qual tem uma complexa diferenciação magmática (FARIA, 2008), no momento da coleta do pó, o sill que estava sendo explorada era diabásio. Três Amostras compostas de pó de rocha de diabásio, com granulometria variável menor que 2 mm coletadas na pilha de moagem, foram peneiradas a seco, obtendo subamostras de areia fina (0,21-0,12 mm) as quais foram submetidas a moagem e passadas por peneira de 200 mesh.

As amostras do pó obtidas foram submetidas à análise química total por fusão por LiBO₂/Li₂B₄O₇ a 1000 °C e dissolução do material em solução de ácido nítrico (4 %), mais ácido hidrocloreídrico (2 %) e analisadas por ICP-OES. Os valores estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. – Teores de óxidos em porcentagem massa/massa da fonte avaliada.

Elemento (óxido)	Teor (%) (m/m)
SiO ₂	52,1
Fe ₂ O ₃	14,45
Al ₂ O ₃	11,9
CaO	6,94
MgO	3,45
Na ₂ O	3,06
K ₂ O	1,59
TiO ₂	3,27
MnO	0,24
P ₂ O ₅	0,75
BaO	0,07
LOI	1,67
Total	100

A composição mineralógica do pó de rocha foi determinada por meio da difração de raios-X de uma amostra completa do pó. Os dados obtidos através de difratômetro (Miniflex II Desktop X-Ray Diffractometer Rigaku, 30 Kv, corrente de 20mA) (Figura 9). O difratograma foi interpretado com base na lista de fases candidatas geradas pela baseCOD (COD-INORG VER 189751 2017.01.03) através da interface do software Match! (Version 3.4.2. build 96, março de 2017, Crystal Impact, Germany). Também foram consultados Brindley and Brown (1980), Moore and Reynolds, (1997).

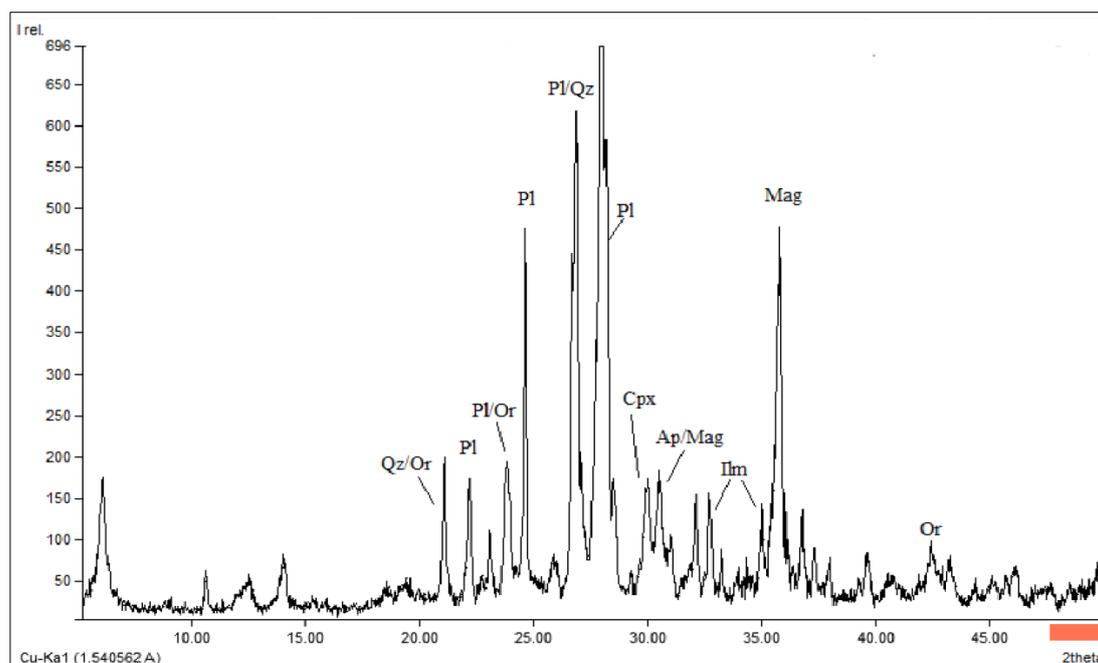


Figura 9. – Difratograma do pó de rocha íntegro empregado no estudo. Qz: quartzo; Ap: Apatita; Cpx: clinopiroxênio; Pl: plagioclásio; Ou: ortoclásio; Mag: magnetita; Ilm: ilmetita (Silva et al. 2017).

4.2.3 Caracterização do solo

Após 18 meses da segunda aplicação do tratamento GEX (em 2013) e dos cultivos sucessivos (Milho, Aveia, Milho), amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0-5 cm nos tratamentos GEX e S. Após, as amostras foram preparadas para determinação da suscetibilidade magnética (SM) e dos teores de Fe e Al cristalinos e amorfos. caracterização granulométrica, análises químicas e determinação.

4.2.3.1 Determinação da susceptibilidade magnética (SM)

A suscetibilidade magnética foi avaliada de acordo com a metodologia descrita no item 3.2.1.3.

4.2.3.2 Caracterização granulométrica e química das amostras de solo

A determinação granulométrica e as análises químicas foram realizadas de acordo com os procedimentos descritos no item 3.2.2.4.1.

4.2.3.3 Teores de Fe_{DCB} , Al_{DCB} e Fe_{ox} , Al_{ox}

As formas cristalinas e de baixa cristalinidade dos óxidos de Fe e Al foram determinadas de acordo com o método descrito no item 3.2.2.5.

4.2.4 Análise estatística

Os dados foram analisados utilizando estatística descritiva, calculando-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Os dados da suscetibilidade das amostras e da curva foram submetidos à análise de variância e avaliados por meio de contrastes ortogonais ao nível de 5% de significância.

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1 Caracterização do solo

Tanto o tratamento GEX quando o tratamento S apresentam baixa expressão magnética (SM), obtendo-se uma média no GEX de $6,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ e no S de $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ (Tabela 9). Estes resultados podem ser em função do material parental do solo que possui teores de Fe intermediários. Entretanto, o tratamento GEX apresentou uma maior expressão magnética em relação ao tratamento S, o que pode estar relacionado aos minerais ferrimagnéticos provenientes do pó de diabásio como magnetita.

Tabela 9. – Teor médio de suscetibilidade magnética (SM) para amostras de solo submetidas aos tratamentos: GEX (com aplicação acumulada de 19 Mg ha⁻¹ de pó de rocha) e S (controle, sem aplicação de pó de rocha), coletadas na profundidade 0-5 cm, para 5 repetições para cada tratamento.

Tratamento	Susceptibilidade Magnética - SM (10⁻⁶ m³ kg⁻¹)
GEX	6,5 ± 0,6
CV(%)	11
S	4,5 ± 0,2
CV(%)	6

De acordo a os estudos de Santos et al., 2018, o solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico.

Além de diferenças nos teores de outros elementos, entre GEX e S, quanto ao conteúdo de P-disponível, obtido pelos métodos de extração com Resina e Mehlich 1, foi observada uma diferença entre os tratamentos GEX e S, onde GEX apresentou valores de 143 e 136 mg dm⁻³, para Resina e Mehlich 1, respectivamente e o tratamento S apresentou valores de 53 e 42 mg dm⁻³, para Resina e Mehlich 1, respectivamente (Tabela 10). Esta diferença pode estar relacionada à aplicação de pó de rocha no tratamento GEX já que, excetuando a aplicação do pó de diabásio no GEX, ambos os tratamentos receberam o mesmo manejo agrônômico.

Tabela 10. –Teores médios de elementos de análise química e granulométrica de GEX (19 Mg ha⁻¹ de Pó) e S (controle) na profundidade 0-5 cm, para 5 repetições por tratamento.

Tratamento	MO	pH	pH	P(Meh-1)	P(Res)	SB	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V ⁽¹⁾	m ⁽²⁾
	g kg ⁻¹	H ₂ O	KCl	-----mg dm ⁻³ -----		----- mmol _c dm ⁻³ -----								
GEX	26	5,6	5,3	142,5	135,5	41,1	2,9	26,9	11,2	3,9	76,4	117,5	35	5,6
CV(%)	25	4	5	35	7	15	19	16	12	43	14	13	9	33
S	29,7	5,4	5	52,7	41,8	34,9	2,5	22,2	10	1,3	82,8	117,7	29,7	3,6
CV(%)	18	2	2	23	12	9	22	10	12	25	8	7	6	22
	Argila			Silte					Areia					
	----- % -----													
GEX	21,6			2,2					76,3					
CV(%)	6			26					2					
S	22,2			2,4					75,4					
CV(%)	8			21					2					

(1) Saturação por bases (2) Saturação por Alumínio

4.3.2 Teores de Fe_{DCB} , Al_{DCB} e Fe_{OX} , Al_{OX}

Os teores de Fe e Al extraídos com DCB (Fe_{DCB} e Al_{DCB}) foram maiores nas amostras do tratamento GEX em comparação com o controle S. Este resultado pode estar relacionado à metodologia utilizada, já que a mesma pode extrair parte do Fe e Al contido em minerais litogênicos, como a rápida formação de fases oxídicas pelo intemperismo acelerado do diabasio (Silva, 2016), podendo superestimar. Este fato também corrobora a presença de uma maior SM (Tabela 9) no tratamento GEX em comparação a S.

Os teores obtidos (Fe_{OX} e Al_{OX}) de baixa cristalinidade foram maiores nas amostras do tratamento GEX em comparação com o controle S. Quanto a relação Fe_{OX}/Fe_{DCB} , a mesma foi baixa para ambos os tratamentos (Tabela 11), indicando o predomínio de formas cristalinas no solo estudado.

Tabela 11. Teores médios de Fe e Al extraídos com DCB (Fe_{DCB} e Al_{DCB}), com oxalato de amônio (Fe_{ox} e Al_{ox}) e relação entre os óxidos OX/DCB, para tratamento GEX (19 Mg ha⁻¹ de Pó) e S (controle) na profundidade 0-5 cm, para 5 repetições para cada tratamento.

Tratamento	Fe_{DCB}	Al_{DCB}	Fe_{OX}	Al_{OX}	Fe_{OX}/Fe_{DCB}	Al_{OX}/Al_{DCB}
	-----g kg ⁻¹ -----				-----%-----	
GEX	19,3	5,8	2,0	1,4	0,1	0,2
CV(%)	23	17	29	10	42	10
S	14,8	4,9	0,9	1,0	0,1	0,2
CV(%)	34	19	10	21	31	21

A composição mineralógica do pó de rocha de diabasio, utilizada no tratamento GEX, possui piroxênios como augitas, plagioclásios e anfibólios e feldspatos potássicos (Faria, 2008) que são fonte de Ca, Na e K. A análise química da composição total do pó de rocha íntegro demonstrou um teor de SiO₂ maior que 50 % e elementos abundantes como Fe, Al, Ca e Mg (Tabela 8), presentes nestes minerais (Figura 9). Durante o intemperismo, estes minerais originam óxidos de Fe e Al pedogênicos, sendo que na maioria dos casos apresentam fases com baixa cristalinidade (amorfos). Estas fases são ricas em grupos funcionais de superfície Ferrol e Aluminol, cuja afinidade por íons fosfato é grande. Neste sentido, a expectativa seria de que o intemperismo do pó de diabásio diminuiria a disponibilidade de P nos solos.

4.3.3 Cálculo do conteúdo de P aportado pelas fontes aplicadas

Ao final do experimento, evidenciou-se um incremento nos teores de P disponível no solo do tratamento GEX, em comparação com o controle S (Tabela 10). Esse incremento pode ter sido influenciado pela presença de pó de rocha junto com as fontes de fertilizante fosfatado aplicadas. O teor de P₂O₅ no pó de diabasio foi de 0,75%, o que equivale, considerando a dose aplicada, a 124 mg dm⁻³ de P, na profundidade de 0-5 cm (Tabela 12). Porém, mesmo que os valores de P no tratamento sejam superiores ao controle mostrado na análise de P, dados obtidos por extração com Resina e Mehlich 1 é necessário avaliar de onde vem este alto incremento de P disponível.

Tabela 12. – Tratamentos, fontes e doses de P aplicados durante o experimento nos tratamentos S e GEX.

Tratamento	Fonte	Dose	P ₂ O ₅	P aplicado		P total
		-----kg ha ⁻¹ -----	---	kg ha ⁻¹ --	mg dm ⁻³ ----	
S	NPK 20- 05 -19	380	19	8	17	90
	NPK 08- 24 -12	350	84	37	73	
GEX	NPK 20- 05 -19	380	19	8	17	214
	NPK 08- 24 -12	350	84	37	73	
	Pó 0,75% P ₂ O ₅	19000	143	62	124	

Estudos tem demonstrado que as apatitas, tem uma baixa taxa de dissolução no solo e assim baixa liberação do P. As apatitas são minerais de pequena solubilidade, tanto em água como em ácido, resultando em eficiência agrônômica muito baixa (Braithwaite et al.,1990). Por isto há necessidade de transformá-lo em produtos que liberem o P para as plantas como o ácido fosfórico (Horowitz & Meurer, 2004).

A solubilização dos elementos presentes no pó de rocha depende de sua exposição na superfície externa do grão de pó, aos agentes do intemperismo (potencial químico, pressão parcial de CO₂, pH, condutividade elétrica, soluções de contato, temperatura, microrganismos, ácidos orgânicos, proximidade da rizosfera, etc.) em diferentes taxas de intemperismo. Quando o P se encontra na fase dissolvida, ainda pode interagir com os grupos funcionais de superfícies dos colóides minerais ou orgânicos de várias formas, e no caso do P, particularmente com os grupos ferrol e aluminol que, para o GEX, deveriam ser mais abundantes devido às fases neoformadas (Fe e Al solúveis em DCB e OX, Tabela 11) (Gillman et al., 2001).

Baseado nos valores da Tabela 12, a razão entre o total de P aportado no tratamento GEX, por aquele aportado no tratamento S é 2.38 (214/90). Já para os valores encontrados no solo, esta razão é de 2.7 (142,5 / 52,7) para a determinação com Mehlich 1 e 3,24 ((135,5/41,8). Portanto, embora quantitativamente possível (Tabela 11), os resultados contrariam a expectativa baseada nos mecanismos gerais do comportamento do P no solo.

No entanto, ainda há que considerar-se que os métodos de extração de P utilizados (Resina e Mehlich 1) podem extrair P diretamente dos grãos de pó de diabásio ainda presentes nas amostras analisadas, inflando os resultados (Escosteguy e Klamt, 199X). Portanto, é necessário analisar com mais detalhe as formas de P presentes nas amostras.

4.4. Conclusões

- Após aplicação do pó de rocha em campo com uma dose acumulada de 19 Mg ha⁻¹ houve um incremento no teor de P disponível em comparação com o controle, além disso também se obteve um saldo de elementos trocáveis favoráveis como Ca, Mg, Na, Si e Fe.
- Os valores de P disponível extraídos pelos métodos da Resina e Mehlich 1 foram 2.5 vezes maiores no tratamento com aplicação de pó de diabásio (GEX) quando comparado com o controle (S). Embora estes

valores estejam abaixo do aporte total de P pela aplicação do pó de rocha no GEX, a pequena solubilidade da apatita (único mineral fonte de P na rocha), a exposição parcial dos cristais de apatita na superfície dos grãos (oclusão dos cristais, e a rápida formação de fases oxídicas, favoráveis ao sequestro de P) contrariam estes resultados.

- No entanto, é possível que os valores obtidos sejam influenciados pela dissolução de P direta a partir dos grãos de pó de rocha com apatita durante os procedimentos metodológicos.
- Portanto, um melhor detalhamento das formas de P nestas amostras pode ser mais esclarecedor.

Referências

Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; De Moraes, J.L.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

Braithwaite, A. C.; Eaton, A. C.; Groom, P. S. 1990. Factors affecting the solubility of phosphate rock residues in 2% citric acid and 2% formic acid. *Fertilizer research*, v. 23, p. 37-42.

Escosteguy, P.A.V., Klamt, E. 1998. Basalto moído como fonte de nutrientes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 22, p.11-20.

Faria, C. A .2008. *Evolução Magmática Do Sill De Limeira: Petrografia E Geoquímica*. p.106.

Gillman, G.P., Burkett, D.C., Coventry, R.J. 2001. A laboratory study of application of basalt dust to highly weathered soils: effect on soil cation chemistry. *Australian Journal of Soil Research*. 9, p.799-811.

Horowitz, N.; Meurer, E. J. 2004 Eficiência agrônômica de fosfatos naturais. In: Yamada, T.; Abdalla, S. R. S. (Eds). *Fósforo na agricultura brasileira*. Piracicaba, POTAFOS, p. 665-682.

Santos. H.G, Dos.; Jacomine, P.K.T.; Anjos, L.H.C. Dos.; Oliveira, V.A. De.; Lumbreras, J.F.; Coelho, M.R.; Almeida, J.A. De.; Araujo Filho, J.C. De.; Oliveira, J.B. DE. Cunha, T.J.F. 2018. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5a ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

Silva, R. C. da. 2016. *Intemperismo de minerais de um remineralizador*. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".83-111 p.

Silva, R. C. da; Cury, M. E.; Ieda, J. J. C.; Sermarini, R. A.; Azevedo, A. C. de; 2017. Chemical attributes of a remineralized Oxisol. *Ciência Rural*, v. 47, n. 11, nov.

5. AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO DO SOLO PELA APLICAÇÃO DE PÓ DE DIABASIO

Resumo

O fósforo (P) é um nutriente cuja extração e do solo e determinação de seus teores podem ser feitas utilizando mais de um método. O objetivo deste trabalho foi avaliar a dinâmica das frações de P no solo (P lábil, P moderadamente lábil e P não lábil) em função da aplicação do pó de rocha no solo. Para isso foram utilizadas as amostras de solo coletadas na camada de 0-10 cm porto feliz e 0-5 cm Pirassununga locais: i) PE: ponto próximo a uma mineradora com presença de eucalipto, em Porto Feliz- SP; ii) PG: ponto próximo a uma mineradora com presença de goiaba, em Porto Feliz- SP; iii) GEX: solo agrícola (milho – aveia – milho) com aplicação de pó de rocha (19 Mg ha⁻¹) e fertilização NPK, em Pirassununga- SP. e iv) S: controle, sem a aplicação de pó de rocha e com fertilização NPK, em Pirassununga- SP. As amostras de solo foram preparadas (terra fina seca ao ar), estimada a adsorção considerando o P-remanescente, determinada a capacidade máxima de adsorção através da equação linear de Langmuir e foi realizado o fracionamento químico de P pelo método de Hedley. Os resultados das diferentes variáveis avaliaram um amplo contraste no comportamento das amostras do tratamento GEX em comparação com os demais tratamentos. Os resultados do fracionamento mostraram que a aplicação do pó de diabasio aumentou a concentração de P nas frações moderadamente a não lábil.

Palavras-chave: Pó de rocha de diabasio; Fracionamento de fósforo; Labilidade.

Abstract

Phosphorus (P) is a nutrient whose extraction from the soil and determination of its contents can be done using more than one method. The objective of this work was to evaluate the dynamics of P fractions in the soil (labile P, moderately labile P and non-labile P) as a function of the application of rock dust in the soil. For this, soil samples collected in the 0-10 cm Porto Feliz and 0-5 cm Pirassununga layers were used: i) PE: point close to a mining company with the presence of eucalyptus, in Porto Feliz-SP; ii) PG: point close to a mining company with presence of guava, in Porto Feliz-SP; iii) GEX: agricultural soil (corn – oats – corn) with application of rock dust (19 Mg ha⁻¹) and NPK fertilization, in Pirassununga-SP. and iv) S: control, without the application of rock dust and with NPK fertilization, in Pirassununga-SP. Soil samples were prepared (air-dried fine earth), the adsorption was estimated considering the P-remaining, the maximum adsorption capacity was determined using the linear Langmuir equation and the chemical fractionation of P was performed using the Hedley method. The results of the different variables evaluated a wide contrast in the behavior of the samples of the GEX treatment in comparison with the other treatments. The fractionation results showed that the application of diabasium powder increased the P concentration in the moderately to non-labile fractions.

Keywords: Diabase rock dust; Phosphorus fractionation; Lability.

5.1. Introdução

Em estudos realizados anteriormente, cujos resultados são apresentados nesta dissertação, no capítulo 3, mostraram que nas amostras de solo submetidas a deposição de pó de diabásio, sem aplicação prévia de P via fertilizante fosfatado, não houve aumento no P disponível.

Já em amostras de solo agrícola, nos quais há uma reserva de P advinda de aplicações passadas (com presença de legado de P do solo) e com posterior aplicação de pó de diabásio, o aumento o P disponível foi pelo menos 2.5 vezes maior em comparação com o solo que não recebeu o pó de diabásio (Capítulo 4 desta dissertação).

Assim, neste capítulo, buscando um maior detalhamento das formas de P do solo, com suas respectivas labilidades, foi realizado um estudo mais aprofundado da dinâmica de P no solo nas diferentes situações mencionadas anteriormente, que permite observar o comportamento do P.

A fração lábil é formada por compostos fosfatados capazes de retornar rapidamente à solução do solo, enquanto que a não-lábil é caracterizada como a fração de íon fosfato que é retida com alta energia às partículas do solo, o que impede o seu equilíbrio com a solução do solo, fazendo com que esta fração deixe de ser disponível para o crescimento imediato das plantas (Novais, 2007).

5.2. Material e Métodos

5.2.1 Amostras de solo

Foram utilizadas amostras de solo, coletadas na profundidade de 0-10 cm, Porto Feliz e 0-5 cm Pirassununga com cinco repetições por cada local, cujos tratamentos foram: i) PE: ponto próximo a uma mineradora com presença de eucalipto, em Porto Feliz- SP; ii) PG: ponto próximo a uma mineradora com presença de goiaba, em Porto Feliz- SP; iii) GEX: solo agrícola (milho – aveia – milho) com aplicação de pó de rocha (19 Mg ha^{-1}) e fertilização NPK, em Pirassununga- SP. e iv) S: controle, sem a aplicação de pó de rocha e com fertilização NPK em Pirassununga- SP. Assim, os tratamentos PE e PG não apresentam legado de P no solo, capítulo 3 desta dissertação) e os tratamentos GEX e S apresentam legado de P no solo, capítulo 4 desta dissertação) As amostras foram preparadas (terra fina seca ao ar – TFSA) e foram submetidas a análises de adsorção e fracionamento de P.

5.2.2 Análises da adsorção de Fósforo

A adsorção foi estimada considerando o P Remanescente (P-rem), representando o potencial de absorção do solo (Isoterma de Ponto Único) (Alvarez et al., 2000).

Teor de fósforo remanescente (P-rem)

O P-rem foi determinado pela concentração de P da solução de equilíbrio após agitação das amostras com uma solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, contendo 60 mg L^{-1} de P, na relação solo: solução 1:10 (Alvarez et al., 2000). Para isso, 5 g de TFSA foram adicionados em 50 mL de solução contendo P a partir do estoque de KH_2PO_4 1.000 mg L^{-1} . Em tubo falcon (50 mL), a solução foi agitada por 1 h e deixada em repouso por 16 horas. O teor de P na solução de equilíbrio foi determinado por colorimetria (Murphy & Riley, 1962). A diferença entre a quantidade de P adicionado e o quantificado na solução de equilíbrio após o período de agitação, representa o valor do P-rem.

Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP)

A determinação da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) foi realizada em quadruplicata e estimada para o solo utilizando uma subamostra de 1,0 g de TFSA. As amostras, foram mantidas em contato com soluções de: 0; 5; 10; 20; 40; 60; 80; 160; 240 e 300 mg L^{-1} de P na forma de KH_2PO_4 (Fosfato de Potássio Monobásico), em meio líquido composto por CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ em um volume de 10 mL em tubos falcon de 50 mL. As doses de P aplicadas, foram definidas de acordo com o valor do P-rem (Alvarez V. et al., 2000), determinadas anteriormente. Após agitação por 24h, as amostras foram centrifugadas por 15 min a 1.844 g (3.000 rpm) e o teor de P em solução foi determinado por colorimetria. A concentração de P adsorvido ao solo, em mg kg^{-1} , foi calculada a partir da equação 1:

$$P_{ads} = (C_i - C_{eq}) FD \quad (1)$$

Onde: P_{ads} é a quantidade de P retida na fase sólida, C_i é a concentração inicial do P em contato com o solo, C_{eq} é a concentração do P em equilíbrio na solução após a agitação e FD é o fator de diluição que considera a relação solução/solo, sendo igual a 10. Os dados obtidos foram aplicados aos modelos de isotermas através de regressão não linear utilizando o software Origin 8.5.1 da OriginLab Corporation. As isotermas de adsorção foram ajustadas de acordo com valores das concentrações de P adsorvido em função das concentrações P em equilíbrio na solução. A isoterma de Langmuir é dada pela equação 2:

$$x/m = (KL \cdot AD_{max} \cdot C_e) / (1 + (KL \cdot C_e)) \quad (2)$$

Onde: x/m = quantidade de P adsorvido ao solo, em $mg \cdot kg^{-1}$; KL = constante relacionada com a energia de adsorção do elemento ao solo, em $L \cdot mg^{-1}$; AD_{max} = CMAP do solo, em $mg \cdot kg^{-1}$; e C_e = concentração de P na solução de equilíbrio, em $mg \cdot L^{-1}$ (Olsen e Watanabe, 1957). As constantes KL e AD_{max} foram estimadas através da equação linear de Langmuir, (Alleoni et al., 1998) obtida pela transformação da equação hiperbólica, que corresponde a:

$$C_e/x/m = 1/KL \cdot aD_{max} + C_e/aD_{max}.$$

5.2.3 Fracionamento químico do fósforo

O fracionamento químico sequencial de fósforo do solo seguiu, em linhas gerais, as recomendações de Hedley et al. (1982) com modificações de Condrón et al. (1985), e adaptações de Rotta (2012). Onde são determinadas as seguintes frações de P de uma mesma amostra de solo, extraídas sequencialmente: fósforo inorgânico (P_i) extraído com resina trocadora aniônica (P_iRTA); P_i e fósforo orgânico (P_o) extraídos com $NaHCO_3$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (P_iBIC e P_oBIC); P_i e P_o extraídos com $NaOH$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ($P_iHID-0,1$ e $P_oHID-0,1$); P_i extraído com HCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ (P_iHCl); P_i e P_o extraídos com $NaOH$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ com o fim de extrair fósforo inorgânico ($P_iNaOH 0,5$) e orgânico ($P_oNaOH 0,5$) não lábil. O fósforo residual (P-Residual) foi extraído do solo residual, mediante a digestão com $H_2SO_4 + H_2O_2 + MgCl_2$ saturado (Brookes; Powlson, 1981). Logo, foi retirada uma alíquota dos extratos alcalinos ($NaHCO_3$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, $NaOH$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e $NaOH$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$) para determinação do Pt por digestão com $(NH_4)_2S_2O_8 + H_2SO_4$ em autoclave (P- Total), com o objetivo de estimar o fósforo orgânico (P_o) de cada fração pela equação: ($P_o = P_t - P_i$) de cada extrato. O teor de P_i dos extratos ácidos (RTA, HCl 1 mol L^{-1} e digestões) foi determinado pelo método de Murphy e Riley (1962). Enquanto que o teor de P_i dos extratos alcalinos (mencionar extratos) foi determinado pelo método proposto por Dick e Tabatabai (1977). Adicionalmente, as diferentes frações de P foram classificadas segundo a labilidade do P de acordo com a força de extração de cada extrator. O P lábil foi considerado as frações de P_i extraído pela RTA e as frações de P_i e P_o extraído pelo bicarbonato de sódio. O P moderadamente lábil, considerou os teores de P_i e P_o extraídos pelo $NaOH$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ junto ao P_i extraído com HCl . O fósforo não lábil, foi constituído pela soma do P_i e P_o extraído pelo $NaOH$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ e o P_i residual, obtido após digestão do solo ao final de todas as extrações. Esse esquema de fracionamento, com as modificações supracitadas, pode ser observado na figura 10.

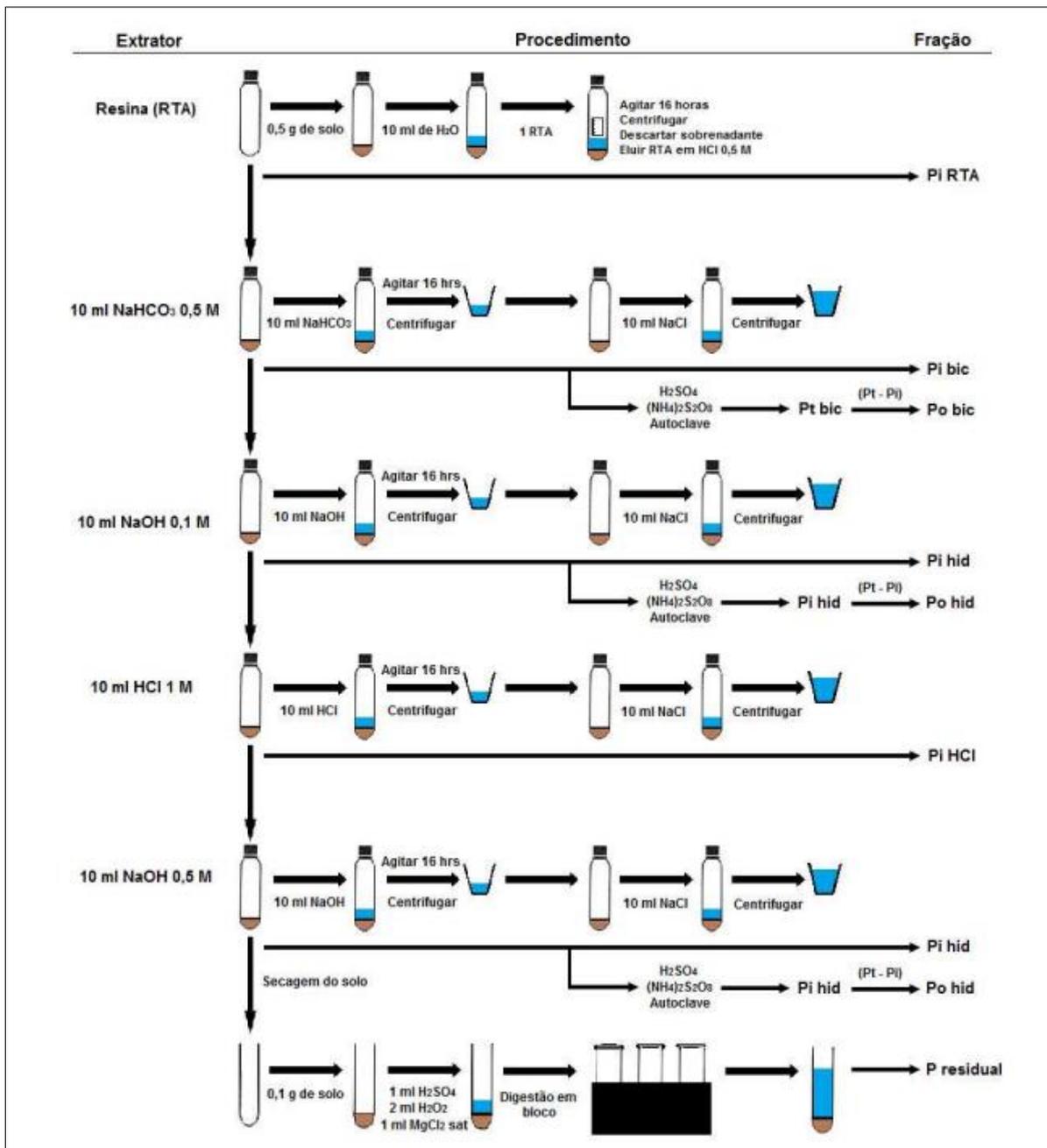


Figura 10. –Esquema do fracionamento químico de P do solo, segundo Hedley et al., 1982 com modificações de Condrón et al., 1985. Adaptado de Rotta (2012).

5.2.4 Análise estatística

Os dados obtidos foram avaliados por meio de análise de variância e posteriormente submetidos ao teste de comparação de médias ao nível de 5% de significância (Tukey).

5.3. Resultados e Discussão

5.3.1 Adsorção e disponibilidade de P

Fósforo remanescente

Os valores médios para o P-rem, na superfície de cada um dos tratamentos, apresentados na tabela 13, são considerados baixos, de acordo com os critérios apresentados por Alvarez et al., (2000).

Tabela 13. – Teores médios de P-rem para os solos estudados solo sem legacy P na profundidade de 0-10 cm, local de amostragem com deposição de pó de rocha **E** e **G** 5 repetições por local e solo com legacy P na profundidade de 0-5 cm, **GEX**: (área com aplicação de 19 Mg ha⁻¹ do pó de rocha) e tratamento **S**: (controle sem pó de rocha) e 5 repetições por tratamento.

Amostras	P-rem mg L ⁻¹	CV (%)
E	14,89±0,16	1
G	14,11±0,11	1
GEX	15,25±0,07	0
S	14,81±0,29	2

Segundo Eberhardt et al., (2008) a amplitude dos valores de P-rem está relacionada com a variabilidade das características físico-químicas, granulométricas e mineralógicas dos solos.

Isotermas de Adsorção de P

Os teores de P adsorvido aumentam proporcionalmente ao aumento da concentração de P em equilíbrio (Figura 11), com altos coeficientes de correlação entre os dados estimados por modelo hiperbólico de Langmuir. Este resultado indica que este modelo descreve adequadamente a adsorção de P nos solos estudados, conforme encontrado por Chaves et al., (2009) e Farias et al., (2009). Há o aumento na quantidade de P adsorvida, em função da quantidade de P na solução de equilíbrio, de forma mais acentuada inicialmente, com diminuição da quantidade de P adsorvido em função da maior concentração de P na solução de equilíbrio. Isso possivelmente se deve ao fato de todos os sítios de adsorção já estarem saturados, resultando em maior concentração de P na solução de equilíbrio. Esse comportamento é semelhante aos que foram verificados por Falcão e Silva (2004) em trabalho realizado com Latossolos e Argissolos.

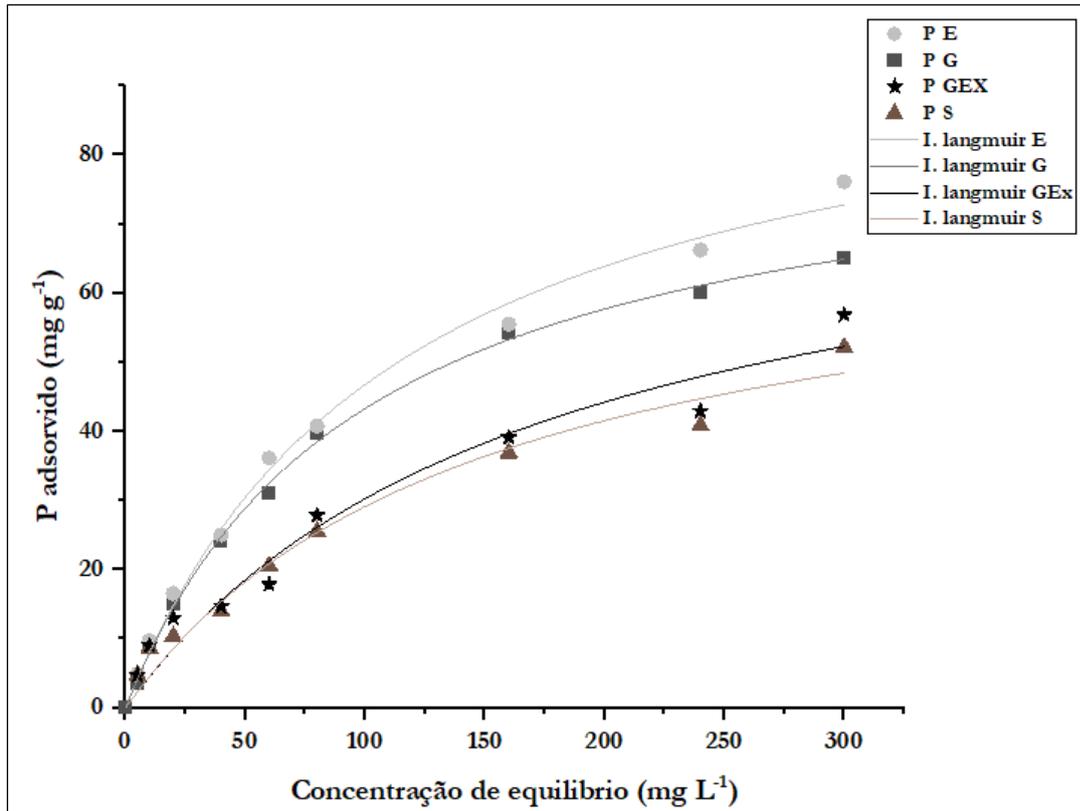


Figura 11. –Ajuste do modelo hiperbólico da isoterma de adsorção de Langmuir, para a quantidade de P adsorvido para cada um dos solos estudados. Solo sem legacy P 0-5 cm, local de amostragem com deposição de pó de rocha E e G e solo com legacy P 0-10 cm, tratamento GEX: Área com aplicação de 19 Mg ha⁻¹ do pó de rocha e S: controle sem pó de rocha.

Capacidade máxima de adsorção de P

De maneira geral, a CMAP para cada solo variou principalmente em função de atributos como teor de argila, óxidos de Fe, de Al e MO. Apesar da variação destes atributos, a CMAP se comportou de maneira semelhante entre as amostras (tabela 14). Os solos sem aplicação de fertilizantes fosfatados (E e G) apresentaram maior capacidade de adsorção de P em relação aos solos com aplicação de fertilizante fosfatado (GEX e S). Para as amostras com aplicação prévia de fertilizante fosfatado, o tratamento GEX absorveu maior quantidade de P (82,14 mg kg⁻¹ de solo) que o controle S (72,34 mg kg⁻¹ de solo). Esta diferença pode estar relacionada ao aumento de grupos funcionais Ferrol e Aluminol, originados nas fases oxídicas recém precipitadas pelo intemperismo de minerais primários ferromagnesianos no pó de diabásio, aplicado no tratamento GEX.

Tabela 14. – Parâmetros da isoterma de Langmuir estimados por meio de ajustes de regressão linear para as amostras de solo estudadas em cada profundidade (0-5 cm e 0-10 cm).

Amostras	Equação de Langmuir	KL L mg ⁻¹	CMAP mg g ⁻¹	R ²
E	$y=0.488x/1+0.00866x$	0,00866	100,79	0,99
G	$y=0.488x/1+0.01005x$	0,01005	86,41	0,99
GEX	$y=0.488x/1+0.00548x$	0,00584	82,14	0,96
S	$y=0.488x/1+0.00675x$	0,00675	72,34	0,97

KL = constante relacionada com a energia de adsorção do elemento ao solo. CMAP=Capacidade máxima de adsorção de fósforo.

5.3.2 Fracionamento químico do fósforo

Observa-se que a distribuição do P nas diferentes frações de acordo com as labilidades (Figura 12), a ausência de fertilizações fosfatadas nas amostras E e S mostrou valores por frações e totais menores aos tratamentos GEX e S, que tiveram aplicação de P, via fertilização fosfatada. Isso indica que há presença do legado de P no solo acumulado por anos de aplicação.

Dentre os tratamentos analisados, o GEX foi o que possui maior P total. Isso pode estar relacionado com o aporte de P₂O₅ gerado pela aplicação de apatita no pó de diabásio. Isso porque, a diferença numérica no P total entre o tratamento GEX e o S é da mesma ordem de grandeza do total de P adicionado pelo pó de diabásio (214 mg dm⁻³) exposto na tabela 12.

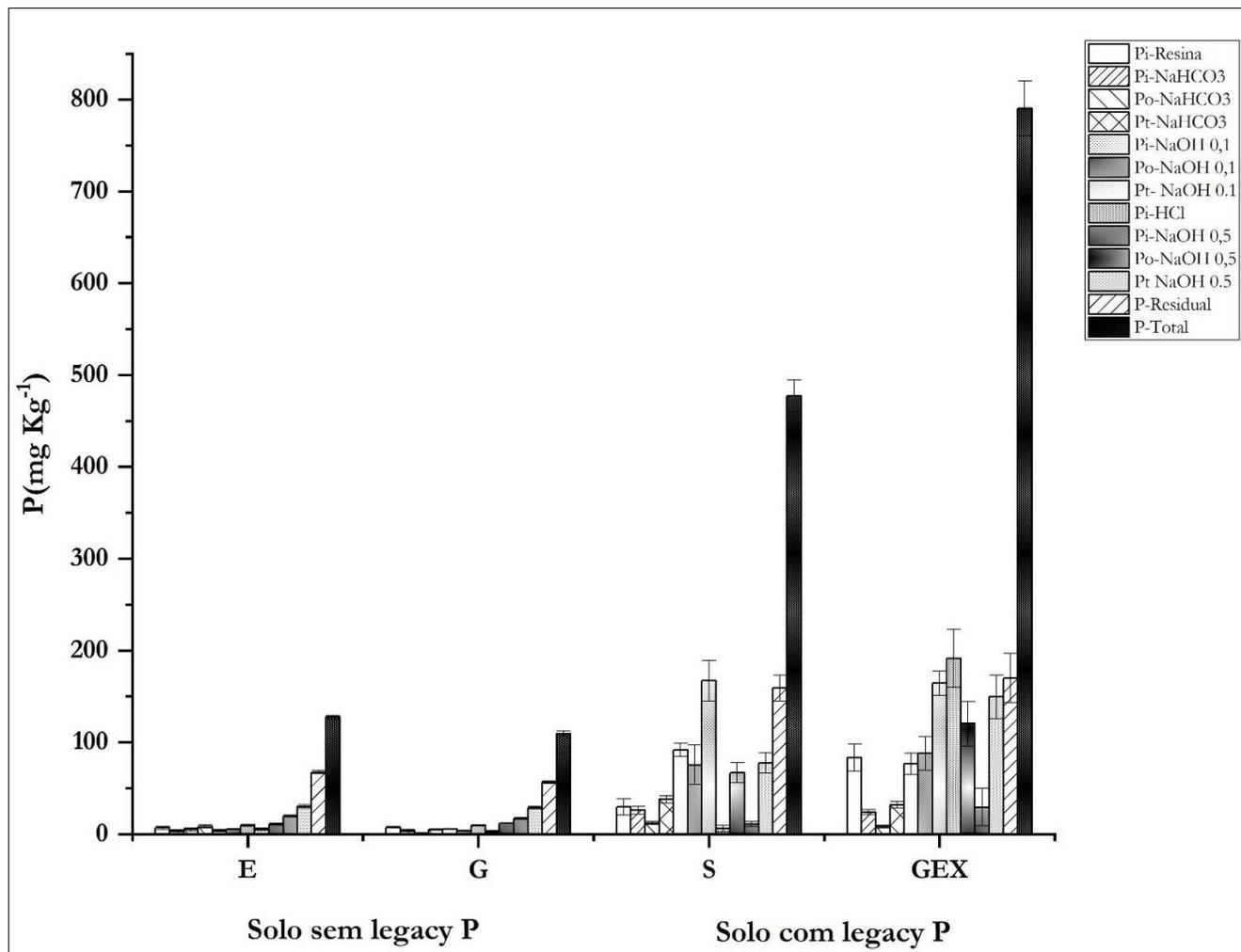


Figura 12. – Frações de P, Solo sem legacy P 0-10 cm, local de amostragem com deposição de pó de rocha E e G e solo com legacy P 0-5 cm, amostras tratamento S: controle sem pó de rocha, GEX: Solo com aplicação de 19 Mg ha⁻¹ do pó de rocha.

A comparação dos resultados do fracionamento das amostras de solo na camada de 0-5 cm resultou em interação significativa ($p < 0,05$) entre o tratamento GEX e o controle S nas frações PiRTA, e Pi inorgânicas Pi-NaOH 0,1, Pi-HCl, Pi-NaOH 0,5, e P-residual enquanto que nas frações orgânicas foi encontrada interação significativa ($p < 0,05$) entre os fatores nas frações Po-NaOH 0,1, Po-NaOH 0,5, e na somatória total das frações (P-Total) (Figura 13).

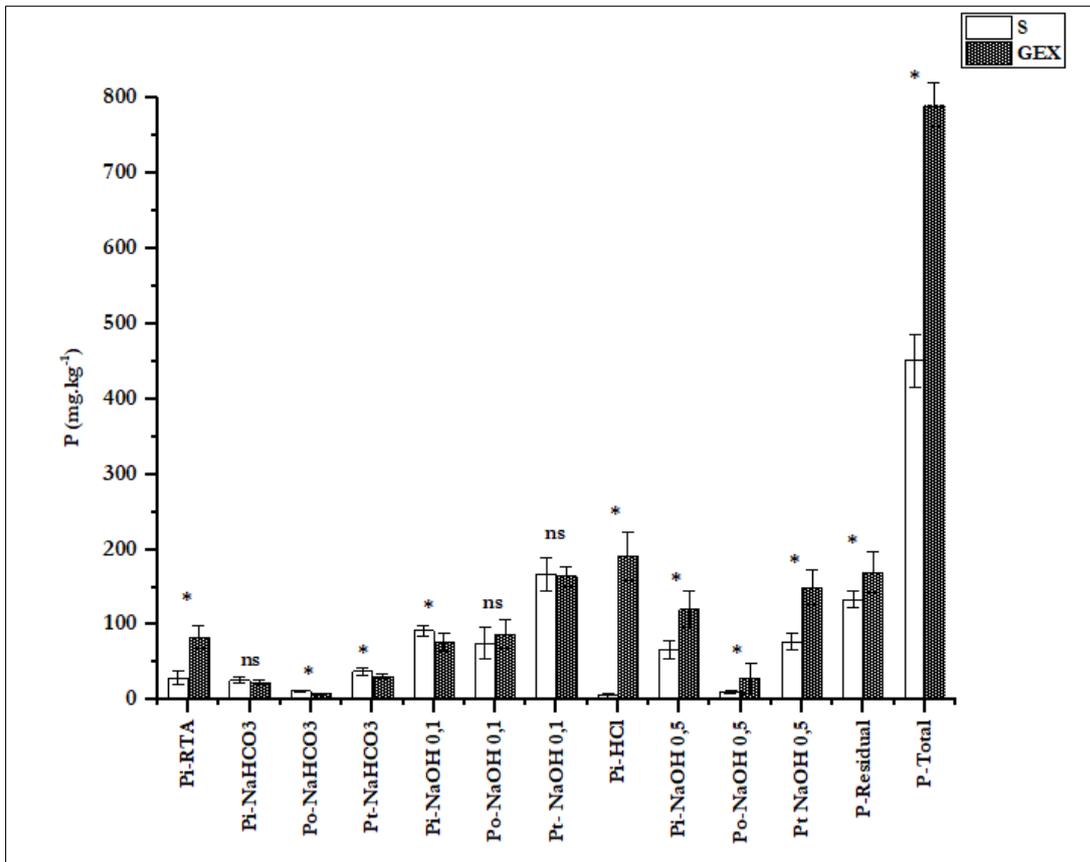


Figura 13. – Frações de P, solo com legacy P, amostras tratamento S: controle sem pó de rocha e GEX: amostras com aplicação de 19 Mg ha⁻¹ do pó de rocha, coletadas na profundidade de 0-5 cm. (*) significativo a 5% ($< 0,05$); (ns) não significativo por contrastes ortogonais.

Comparando a fração P inorgânico (Pi-HCl) entre os tratamentos S e GEX, houve diferença significativa, onde GEX apresentou um valor superior dessa fração. O extrator HCl 1 mol L⁻¹, utilizado na sequência do fracionamento, extrai as formas inorgânicas de P associadas ao Ca (Cross & Schlesinger, 1995), sendo considerada uma fração moderadamente lábil. A interação do P com Ca pode acontecer tanto nos minerais primários como nos secundários, sendo observada em fertilizantes fosfatados não acidulados como os fosfatos naturais (Gatiboni, 2003). Os resultados de Pi-HCl mostraram teores superiores com o uso da aplicação do pó de diabásio, em GEX, comparado ao controle S. Isso pode estar relacionado com a aplicação de pó de rocha em GEX, já que esse material é rico em apatita (P-Ca).

Verificou-se também diferença entre GEX e S nas frações extraídas com NaOH 0,5 mol L⁻¹, que são frações orgânicas e inorgânicas de P fisicamente protegidas no interior de microagregados (Cross & Schlesinger,

1995) e não disponíveis às plantas. Segundo Gatiboni (2003), a fração inorgânica extraída por NaOH 0,5 mol L⁻¹ comporta-se como dreno do P aplicado, pois teoricamente seria o P ligado aos grupos OH⁻ da superfície das argilas e óxidos de Fe e Al (Ferrol e Aluminol), cujos sítios têm alta capacidade de sorção e, em consequência, são propensos à adsorção do P da solução.

A fração residual (Figura 13), também apresentou diferença significativa entre GEX e S. Essa fração, considerada não-lábil, é representada por formas inorgânicas e orgânicas de alta recalcitrância, que podem ser lentamente disponibilizadas às plantas (Gatiboni et al., 2007, 2013).

5.3.3 Compartimentos de fósforo segundo a labilidade

Assim, as diferentes formas de P determinadas pelo fracionamento sequencial de Hedley são ordenadas de acordo com sua disponibilidade, começando das frações mais disponíveis para a planta e microrganismos até as formas biologicamente indisponíveis (Gatiboni, 2003). Estudos têm relatado que os solos desse P altamente lábil e o convertem em formas de P fortemente sorvidas moderadamente e não lábeis estáveis, dependendo da mineralogia intrínseca do solo (Negassa et al., 2009). (Figura 14).

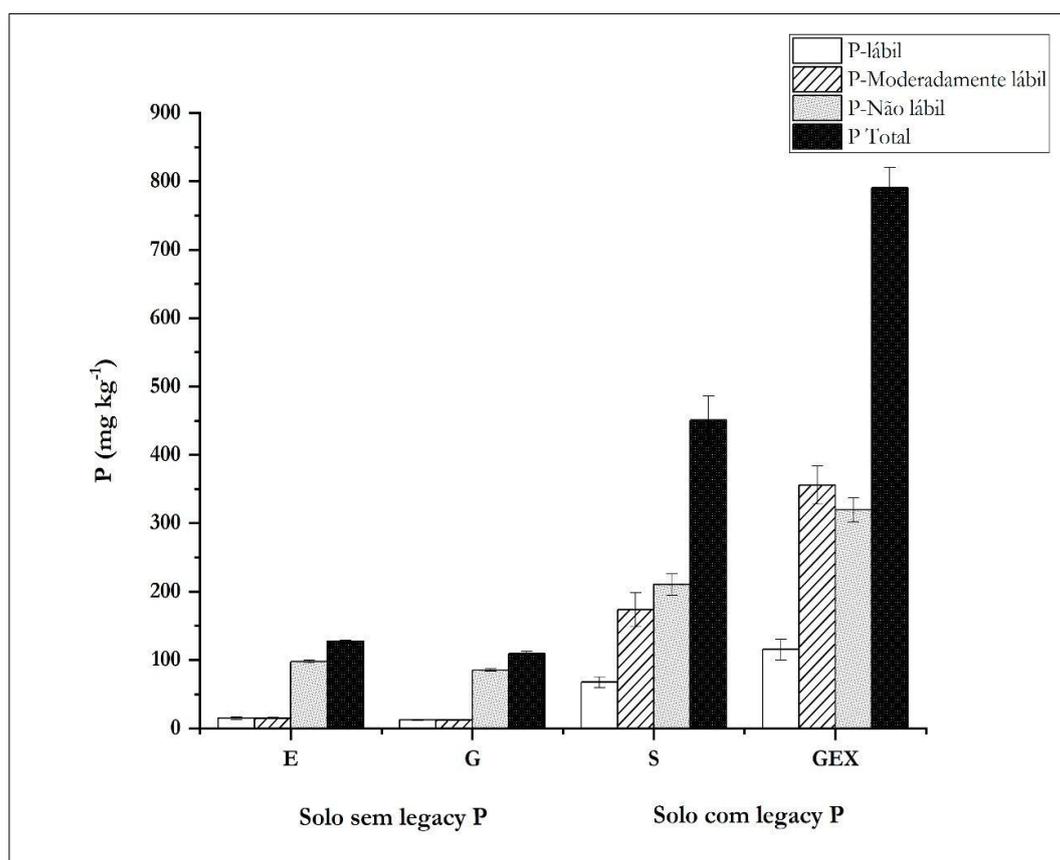


Figura 14. – Distribuição das frações de P no solo de acordo com sua labilidade, amostras de solo sem legacy P e com deposição de pó de rocha E e G profundidade 0-10 cm e solo com legacy P 0-5 cm, tratamento S: controle sem pó de rocha, GEX: Solo com aplicação de 19 Mg ha⁻¹ do pó de rocha, 5 repetições para cada grupo de amostras.

Evidencia-se na figura 14, uma quantidade maior de P nas frações de solo que receberam e fertilizante P em comparação com os solos não agrícolas, sem histórico de fertilização com P. Houve interação significativa ($p < 0,05$) entre o tratamento GEX e o controle S nas frações lábil, moderadamente lábil e não lábil do solo, assim como no P total (Figura 15).

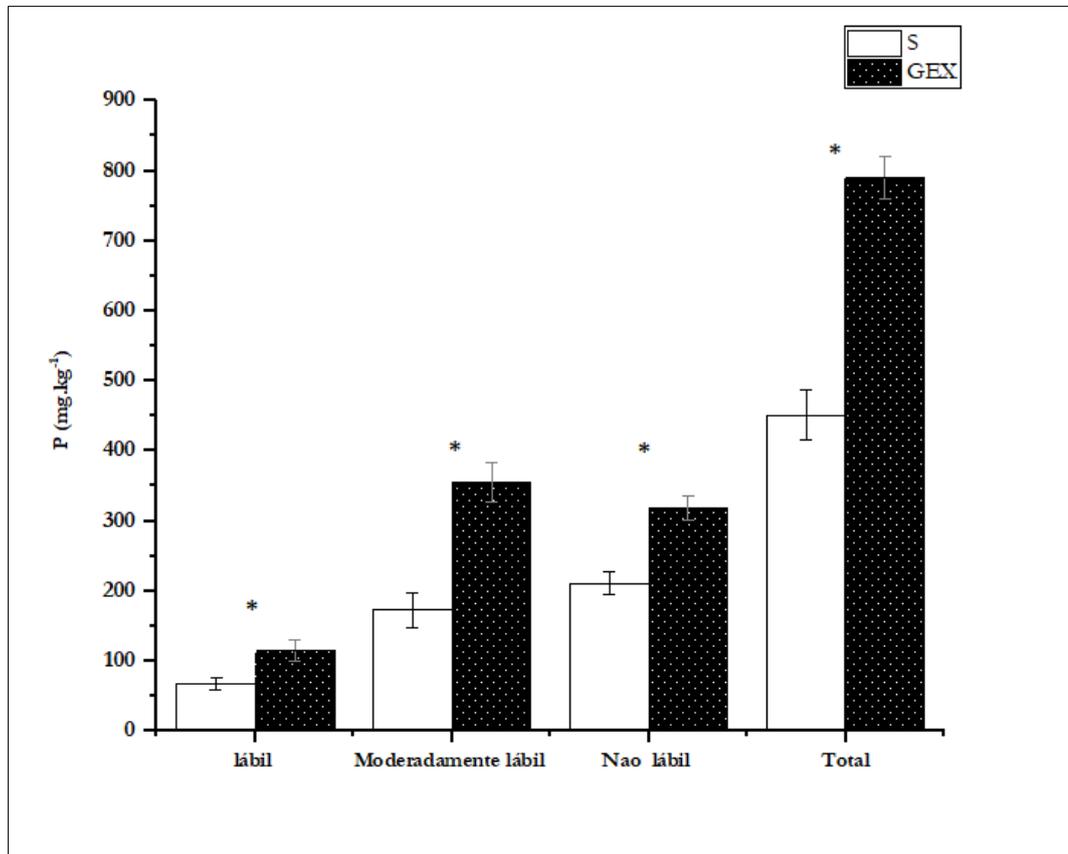


Figura 15. – Distribuição das frações de P, solo com legacy P, amostras tratamento S: controle sem pó de rocha e GEX: amostras com aplicação de 19 Mg ha⁻¹ do pó de rocha, coletadas na profundidade de 0-5 cm. (*) significativo a 5% ($< 0,05$); (ns) não significativo por contrastes ortogonais.

As análises desses resultados revelaram que o pó de rocha adicionado às amostras do solo tratamento GEX incrementou, principalmente, a fração moderadamente lábil (P_i NaOH 0,1 mol L⁻¹) e, em menor quantidade, as frações que compõem o P lábil do solo (P_i NaHCO₃ e P_i RTA).

5.4. Conclusões

- A presença do pó de diabásio aumentou a concentração de P nas frações moderadamente a não lábil. Em consequência de desse efeito, há um aumento no P-total que pode ser influenciado pelo aporte de P₂O₅ presente nas apatitas do diabásio.
- Estes resultados sugerem que os resultados obtidos em análises de rotina para determinação de P disponível podem ser superestimados em solos com aplicação de pó de diabásio.

- Foi observado um aumento na capacidade de adsorção de P no solo onde foi aplicado pó de diabasio, possivelmente associado ao aumento das fases de Fe e Al recém precipitadas a partir dos minerais ferromagnesianos presentes no diabasio, outra fase a considerar seria o Si, já que a rocha tem alto teor deste.

Referências

Alleoni, L.R.F., Camargo, O.A. e Casagrande, J.C. 1998. Isotermas de langmuir e de freundlich na descrição da adsorção de boro em solos altamente intemperizados. *Scientia Agricola* [online]. v. 55, n. 3, p. 379-387.

Alvarez, V. V.H.; Novais, R.F.; Dias, L.E.; Oliveira, J.A. 2000. Determinação e uso do fósforo remanescente. *Boletim Informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 25, p. 27-32.

Brookes, P.C.; Powlson, D.S. 1981. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Hoboken, v. 32, n. 7, p. 671-674.

Chaves, L.H.G.; Chaves, I.B.; Nascimento, A.K.S.; Sousa, A.E.C. 2009. Características de adsorção de fósforo em argissolos, plintossolos e cambissolos do Estado da Paraíba. *Engenharia Ambiental*, Espírito Santo do Pinhal, v.6, n.2, p.130-139.

Condron, L.; Goh, K.; Newman, R. 1985. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. *Journal of Soil Science*, Oxford, v. 36, n. 2, p. 199-207.

Cross, A.F.; Schlesinger, W.H. 1995. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, Amsterdam, v. 64, n. 3, p. 197-214.

Dick, W.A.; Tabatabai, M.A. 1977. Determination of orthophosphate in aqueous-solutions containing labile organic and inorganic phosphorus-compounds. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v. 6, n. 1, p. 82-85.

Eberhardt, D. N.; Vendrame, P. R. S.; Becquer, T.; Guimarães, M. F. 2008. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em Latossolos sob pastagens no cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 32, N.3.

Falcão, N. P. S.; Silva, J. R. A.2004. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. *Acta Amazônica*, Manaus, v.34, n.3, p. 337-342.

Farias, D.R.; Oliveira, F.H.T.; Santos, D.; Arruda, J.A.; Hoffmann, R.B.; Novais, R.F. 2009. Fósforo em solos representativos do Estado da Paraíba. I- Isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa-MG, v.33, p.623-632.

Gatiboni L.C.; Kaminski J.; Rheinheimer D.S.; Brunetto G. 2003. Superphosphate and rock phosphates as phosphorus sources for grass-clover pasture on a limed acid soil in southern Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 34:2.503-2.514.

Gatiboni, L.C.; Kaminski, J.; Rheinheimer, D.S.; Flores, J.P.C. 2007. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 691-699.

Gatiboni, L.C.; Brunetto, G.; Rheinheimer, D.S.; Kaminski, J. 2013. Fracionamento químico das formas de fósforo no solo: usos e limitações. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, v. 8, p. 141-187.

Hedley, M.J.; Stewart, J.W.B.; Chauhan, B.S. 1982. Changes in inorganic and organic soil-phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 46, n. 5, p. 970-976.

Murphy, J.; Riley, J.P.; 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters, *Analytica Chemical Acta*, Volume 27, P.31-36.

Negassa, W.; Leinweber, P. 2009. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Rostock, v. 172, n. 3, p. 305-325.

Novais, R.F., Smyth, T.H. and Nunes, F.N. 2007. Fósforo. In: Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B. & Neves, J.C.L. *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-537.

Rotta, L.R. 2012. Fracionamento e disponibilidade de fósforo em uma cronosequência de cultivos sob plantio direto. 2012. 72 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal de Goiás, Jataí.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, foi possível observar que no capítulo (cap 3) que com presença de pó de rocha por longos períodos de tempo e em grande quantidade não teve uma influência no incremento no teor de P no solo em locais próximos de mineradoras. No (cap 4) o uso de pó de rocha e um P que já estava no solo devido a fertilizações fosfatadas anteriores (legado de P), apresentou um incremento no P disponível, ao fazer os cálculos do aporte de P pelas apatitas do pó de rocha, elas não têm grande capacidade de dissolução para ter esse grande incremento do P disponível. Sendo outro o mecanismo de liberação do P. E por último (cap 5) ao realizar o estudo sobre as labilidades / disponibilidade em amostras representativas dos capítulos anteriores onde tinha situações com legado de P e sem legado de P, a presença do pó de diabasio aumentou a concentração de P nas frações moderadamente a não lábil, do solo com legado de P.

Com base nos resultados obtidos, assim como nos resultados encontrados na literatura, um ponto a considerar em estudos de solos que receberam a aplicação de pó de rocha ou remineralizadores é a metodologia a ser aplicada, já que algumas metodologias padrões, como a utilizada no Estado de São Paulo para a determinação da fertilidade em solo, podem estar superestimando os teores de alguns elementos trocáveis, como no caso do P. Portanto, seria adequado avaliar outros métodos de extração para garantir a confiabilidade na obtenção dos resultados.

Para estudos futuros, sugere-se 1) avaliar a absorção de P pelas plantas cultivadas em solos com e sem aplicação de P; 2) realizar experimentos específicos para quantificar o balanço entre o fornecimento extra de P pelo pó de diabasio e o possível aumento de adsorção de P por fases de Fe, Al e Si recém precipitadas a partir do pó de diabasio; 3) avaliar o papel do aumento no P-total em solos com pó de diabasio no tamponamento do fornecimento de P para as plantas, em longo prazo, na ausência ou interrupção de fornecimento de P através de fertilizantes.

Este trabalho teve um enfoque mineralógico sobre a aplicação de pó de rocha no solo. Com o propósito de dar continuidade a esta pesquisa, sugere-se a continuação desta pesquisa com uma etapa seguinte envolvendo o estudo dos diversos mecanismos que estão ocorrendo no solo, com a aplicação de pó de diabásio, como a ação biológica dos microrganismos, que podem fazer com que o P do solo, seja o legado de P do solo ou o P fornecido pela aplicação do pó de rocha, se torne disponível para as plantas.

APÊNDICES

Apêndice A. Tabela de dados Figura 12

Amostras	Pi-RTA	desv	Pi-NaHCO ₃	desv	Po-NaHCO ₃	desv	Pt-NaHCO ₃	desv	Pi-NaOH 0,1	desv	Po-NaOH 0,1	desv	Pt- NaOH 0,1	desv
E	6,8	1,6	3,3	1,3	5,0	1,6	8,3	1,8	3,9	1,3	5,4	0,7	9,3	1,1
G	7,4	0,7	3,9	1,1	1,1	0,7	5,0	0,5	5,6	0,5	3,8	0,7	9,4	0,5
S	29,6	8,8	25,8	4,0	12,0	1,6	37,8	4,3	91,8	7,1	75,4	21,5	167,2	22,2
GEX	83,3	14,6	23,7	2,6	8,2	1,5	31,9	3,5	76,5	11,5	87,9	18,2	164,4	13,1

Amostras	Pi-HCl	desv	NaOH	desv	NaOH	desv	NaOH	desv	Residu	desv	P-Total	desv
E	5,5	1,1	10,6	1,1	19,6	1,1	30,2	1,8	67,4	1,5	127,4	1,8
G	2,5	1,1	11,8	0,5	16,9	1,1	28,6	1,2	56,4	1,5	109,4	3,1
S	6,1	3,4	66,7	11,2	10,8	2,7	77,6	11,1	132,9	11,0	451,1	34,9
GEX	191,3	31,4	120,4	24,1	29,1	20,4	149,5	23,6	169,8	26,9	790,3	29,5

Apêndice B. Tabela de dados Figura 13

Fracionamento	S	desv	GEX	desv
Pi-RTA	29,57	8,80	83,34	14,59
Pi-NaHCO ₃	25,85	4,02	23,67	2,62
Po-NaHCO ₃	11,98	1,57	8,21	1,45
Pt-NaHCO ₃	37,83	4,33	31,88	3,49
Pi-NaOH 0,1	91,80	7,14	76,49	11,55
Po-NaOH 0,1	75,40	21,51	87,88	18,21
Pt- NaOH 0,1	167,20	22,17	164,37	13,11
Pi-HCl	6,06	3,41	191,35	31,45
Pi-NaOH 0,5	66,74	11,22	120,40	24,10
Po-NaOH 0,5	10,85	2,75	29,13	20,35
Pt NaOH 0,5	77,59	11,06	149,53	23,60
P-Residual	132,89	10,97	169,80	26,90
P-Total	451,15	34,91	790,26	29,53

Apêndice C. Tabela de dados Figura 14

Amostras	Labil	desv	Moderadam ente Labil	desv	Nao Labil	desv	Total	desv
E	15,08	1,81	14,72	1,30	97,63	2,07	127,43	1,77
G	12,39	0,57	11,96	0,84	85,06	1,93	109,42	3,09
S	67,40	7,73	173,26	24,93	210,48	16,07	451,15	34,91
GEX	115,21	15,13	355,72	28,00	319,32	17,49	790,26	29,53

Apêndice D. Tabela de dados Figura 15

Labilidade	S	desv	GEX	desv
labil	67,40	7,73	115,21	15,13
Moderadament e labil	173,26	24,93	355,72	28,00
Nao labil	210,48	16,07	319,32	17,49
Total	451,15	34,91	790,26	29,53

Apêndice E. Análise estatística Figura 13 e Figura 15

Variável analisada: PIRTA1

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	7225.344000	7225.344000	49.935	0.0001
erro	8	1157.560000	144.695000		
Total corrigido	9	8382.904000			
CV (%) =	21.31				
Média geral:	56.4600000	Número de observações:		10	

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmônica do número de repetições (r): 5
 Erro padrão de cada média dessa FV: 5,37949811785449
 CONTRASTE NÚMERO 1

O contraste testado está apresentado a seguir:

Nível dessa Fonte de Variação Coeficientes

S	1.0000
GEX	-1.0000

Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por 1 e os negativos por 1

Estimativa	: -53.76000000
DMS Scheffé	: 17.54355545
NMS:	: 0,05
Variância	: 57.87800000
Erro padrão	: 7.60775920
t para H0: Y = 0	: -7.066
Pr> t	: 0.000
F para H0: Y = 0	: 49.935
Pr>F	: 0.000
F exata Scheffé	: 0.000

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste	1	1	35.344000	15.471	0.0043
Erro	8	1157.560000	144.695000		

Variável analisada: PINARCO2

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	11.664000	11.664000	1.012	0.3438
erro	8	92.180000	11.522500		
Total corrigido	9	103.844000			
CV (%) =	13.71				
Média geral:	24.7600000	Número de observações:		10	

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmônica do número de repetições (r): 5
 Erro padrão de cada média dessa FV: 1,51805796990761
 CONTRASTE NÚMERO 1

O contraste testado está apresentado a seguir:

Nível dessa Fonte de Variação Coeficientes

S	1.0000
GEX	-1.0000

Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por 1 e os negativos por 1

Estimativa	: 2.16000000
DMS Scheffé	: 4.95067264
NMS:	: 0,05
Variância	: 4.60900000
Erro padrão	: 2.14685817
t para H0: Y = 0	: 1.006
Pr> t	: 0.344
F para H0: Y = 0	: 1.012
Pr>F	: 0.344
F exata Scheffé	: 0.344

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste	1	1	11.664000	1.012	0.3438
Erro	8	92.180000	11.522500		

Variável analisada: PONARCO3

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	35.344000	35.344000	15.471	0.0043
erro	8	18.276000	2.284500		
Total corrigido	9	53.620000			
CV (%) =	14.96				
Média geral:	10.1000000	Número de observações:		10	

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmônica do número de repetições (r): 5
 Erro padrão de cada média dessa FV: 0,675943784644848
 CONTRASTE NÚMERO 1

O contraste testado está apresentado a seguir:

Nível dessa Fonte de Variação Coeficientes

S	1.0000
GEX	-1.0000

Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por 1 e os negativos por 1

Estimativa	: 3.76000000
DMS Scheffé	: 2.20437985
NMS:	: 0,05
Variância	: 0.91380000
Erro padrão	: 0.95592887
t para H0: Y = 0	: 3.933
Pr> t	: 0.004
F para H0: Y = 0	: 15.471
Pr>F	: 0.004
F exata Scheffé	: 0.004

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste	1	1	35.344000	15.471	0.0043
Erro	8	18.276000	2.284500		

Variável analisada: PTNARCO4

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	88.209000	88.209000	5.728	0.0436
erro	8	123.192000	15.399000		
Total corrigido	9	211.401000			
CV (%) =	11.25				
Média geral:	34.8700000	Número de observações:		10	

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmônica do número de repetições (r): 5
 Erro padrão de cada média dessa FV: 1,75493589626516
 CONTRASTE NÚMERO 1

O contraste testado está apresentado a seguir:

Nível dessa Fonte de Variação Coeficientes

S	1.0000
GEX	-1.0000

Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por 1 e os negativos por 1

Estimativa	: 5.94000000
DMS Scheffé	: 5.72317613
NMS:	: 0,05
Variância	: 6.15960000
Erro padrão	: 2.48185415
t para H0: Y = 0	: 2.393
Pr> t	: 0.044
F para H0: Y = 0	: 5.728
Pr>F	: 0.044
F exata Scheffé	: 0.044

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste	1	1	88.209000	5.728	0.0436
Erro	8	123.192000	15.399000		

Variável analisada: PINARCO5

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	585.225000	585.225000	6.357	0.0357
erro	8	736.520000	92.065000		
Total corrigido	9	1321.745000			
CV (%) =	11.40				
Média geral:	84.1500000	Número de observações:		10	

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmônica do número de repetições (r): 5
 Erro padrão de cada média dessa FV: 4,29103717066166
 CONTRASTE NÚMERO 1

O contraste testado está apresentado a seguir:

Nível dessa Fonte de Variação Coeficientes

S	1.0000
GEX	-1.0000

Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por 1 e os negativos por 1

Estimativa	: 15.30000000
DMS Scheffé	: 13.99387952
NMS:	: 0,05
Variância	: 36.82600000
Erro padrão	: 6.06844296
t para H0: Y = 0	: 2.521
Pr> t	: 0.036
F para H0: Y = 0	: 6.357
Pr>F	: 0.036
F exata Scheffé	: 0.036

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste 1	1	585.225000	585.225000	6.357	0.0357
Erro	8	736.520000	92.065000		

Variável analisada: PONA0H6

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	389.376000	389.376000	0.981	0.3510
erro	8	3175.888000	396.986000		
Total corrigido	9	3565.264000			

CV (%) = 24.41
Média geral: 81.6400000 Número de observações: 10

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmonica do número de repetições (r): 5
Erro padrão de cada média dessa FV: 8,91051064754428

CONTRASTE NÚMERO 1

O contraste testado está apresentado a seguir:

Nível dessa Fonte de Variação	Coefficientes
S	1.0000
GEX	-1.0000

Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por 1 e os negativos por 1

Estimativa : -12.48000000
DMS Scheffé : 29.05885162
NMS: : 0,05
Variância : 158.79440000
Erro padrão : 12.60136501
t para H0: Y = 0 : -0.990
Pr>|t| : 0.351
F para H0: Y = 0 : 0.981
Pr>F : 0.351
Pr exata Scheffé : 0.351

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste 1	1	389.376000	389.376000	0.981	0.3510
Erro	8	3175.888000	396.986000		

Variável analisada: PTNAOH7

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	20.164000	20.164000	0.061	0.8113
erro	8	2649.912000	331.239000		
Total corrigido	9	2670.076000			

CV (%) = 10.98
Média geral: 165.7800000 Número de observações: 10

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmonica do número de repetições (r): 5
Erro padrão de cada média dessa FV: 8,1392715200217

CONTRASTE NÚMERO 1

O contraste testado está apresentado a seguir:

Nível dessa Fonte de Variação	Coefficientes
S	1.0000
GEX	-1.0000

Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por 1 e os negativos por 1

Estimativa : 2.84000000
DMS Scheffé : 26.54370757
NMS: : 0,05
Variância : 132.49560000
Erro padrão : 11.51067331
t para H0: Y = 0 : 0.247
Pr>|t| : 0.811
F para H0: Y = 0 : 0.061
Pr>F : 0.811
Pr exata Scheffé : 0.811

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste 1	1	20.164000	20.164000	0.061	0.8113
Erro	8	2649.912000	331.239000		

Variável analisada: PIHCL8

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	85921.696000	85821.696000	171.540	0.0000
erro	8	4002.404000	500.300500		
Total corrigido	9	89824.100000			

CV (%) = 22.66
Média geral: 98.7000000 Número de observações: 10

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmonica do número de repetições (r): 5
Erro padrão de cada média dessa FV: 10,0030045486344

CONTRASTE NÚMERO 1

O contraste testado está apresentado a seguir:

Nível dessa Fonte de Variação	Coefficientes
S	1.0000
GEX	-1.0000

Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por 1 e os negativos por 1

Estimativa : -185.28000000
DMS Scheffé : 32.62167977
NMS: : 0,05
Variância : 200.12020000
Erro padrão : 14.14638470
t para H0: Y = 0 : -13.097
Pr>|t| : 0.000
F para H0: Y = 0 : 171.540
Pr>F : 0.000
Pr exata Scheffé : 0.000

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste 1	1	85821.696000	85821.696000	171.540	0.0000
Erro	8	4002.404000	500.300500		

Variável analisada: PINAOH9

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	7198.489000	7198.489000	20.340	0.0020
erro	8	2831.252000	353.906500		
Total corrigido	9	10029.741000			

CV (%) = 20.11
Média geral: 93.5700000 Número de observações: 10

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmonica do número de repetições (r): 5
Erro padrão de cada média dessa FV: 8,4131623067667

CONTRASTE NÚMERO 1

O contraste testado está apresentado a seguir:

Nível dessa Fonte de Variação	Coefficientes
S	1.0000
GEX	-1.0000

Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por 1 e os negativos por 1

Estimativa : -53.66000000
DMS Scheffé : 27.43690511
NMS: : 0,05
Variância : 141.56260000
Erro padrão : 11.89800824
t para H0: Y = 0 : -4.510
Pr>|t| : 0.002
F para H0: Y = 0 : 20.340
Pr>F : 0.002
Pr exata Scheffé : 0.002

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste 1	1	7198.489000	7198.489000	20.340	0.0020
Erro	8	2831.252000	353.906500		

Variável analisada: PONA0H10

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	833.569000	833.569000	3.946	0.0822
erro	8	1689.780000	211.222500		
Total corrigido	9	2523.349000			

CV (%) = 72.70
Média geral: 19.9900000 Número de observações: 10

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmonica do número de repetições (r): 5
Erro padrão de cada média dessa FV: 6,49957690930725

CONTRASTE NÚMERO 1

O contraste testado está apresentado a seguir:

Nível dessa Fonte de Variação	Coefficientes
S	1.0000
GEX	-1.0000

Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por 1 e os negativos por 1

Estimativa : -18.26000000
DMS Scheffé : 21.19634311
NMS: : 0,05
Variância : 84.48900000
Erro padrão : 9.19179981
t para H0: Y = 0 : -1.987
Pr>|t| : 0.082
F para H0: Y = 0 : 3.946
Pr>F : 0.082
Pr exata Scheffé : 0.082

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste 1	1	833.569000	833.569000	3.946	0.0822
Erro	8	1689.780000	211.222500		

Variável analisada: PTNAOH11

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	12931.216000	12931.216000	38.032	0.0003
erro	8	2720.068000	340.008500		
Total corrigido 9 15651.284000					
CV (%) = 16.24					
Média geral: 113.5600000 Número de observações: 10					

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmonica do número de repetições (r): 5
 Erro padrão de cada média dessa FV: 8,24631432823173
 CONTRASTE NÚMERO 1

O contraste testado está apresentado a seguir:

Nível dessa Fonte de Variação	Coefficientes
S	1.0000
GEX	-1.0000

Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por 1 e os negativos por 1

Estimativa	: -71.92000000
DMS Scheffé	: 26.89278246
NMS:	: 0,05
Variância	: 136.00340000
Erro padrão	: 11.66204956
t para H0: Y = 0	: -6.167
Pr> t	: 0.000
F para H0: Y = 0	: 38.032
Pr>F	: 0.000
Pr exata Scheffé	: 0.000

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste	1	12931.216000	12931.216000	38.032	0.0003
Erro	8	2720.068000	340.008500		

Variável analisada: PRESIDUAL1

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	3404.025000	3404.025000	8.061	0.0218
erro	8	3378.296000	422.287000		
Total corrigido 9 6782.321000					
CV (%) = 13.58					
Média geral: 151.3300000 Número de observações: 10					

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmonica do número de repetições (r): 5
 Erro padrão de cada média dessa FV: 9,19007072878115
 CONTRASTE NÚMERO 1

O contraste testado está apresentado a seguir:

Nível dessa Fonte de Variação	Coefficientes
S	1.0000
GEX	-1.0000

Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por 1 e os negativos por 1

Estimativa	: -36.90000000
DMS Scheffé	: 29.97054964
NMS:	: 0,05
Variância	: 168.91480000
Erro padrão	: 12.99672266
t para H0: Y = 0	: -2.839
Pr> t	: 0.022
F para H0: Y = 0	: 8.061
Pr>F	: 0.022
Pr exata Scheffé	: 0.022

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste	1	3404.025000	3404.025000	8.061	0.0218
Erro	8	3378.296000	422.287000		

Variável analisada: POTAL13

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	287505.936000	287505.936000	275.128	0.0000
erro	8	8359.924000	1044.990500		
Total corrigido 9 295865.860000					
CV (%) = 5.21					
Média geral: 620.7000000 Número de observações: 10					

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmonica do número de repetições (r): 5
 Erro padrão de cada média dessa FV: 14,4567665817776
 CONTRASTE NÚMERO 1

O contraste testado está apresentado a seguir:

Nível dessa Fonte de Variação	Coefficientes
S	1.0000
GEX	-1.0000

Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por 1 e os negativos por 1

Estimativa	: -339.12000000
DMS Scheffé	: 47.14623568
NMS:	: 0,05
Variância	: 417.99620000
Erro padrão	: 20.44495537
t para H0: Y = 0	: -16.587

Pr> t	: 0.000
F para H0: Y = 0	: 275.128
Pr>F	: 0.000
Pr exata Scheffé	: 0.000

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste	1	287505.936000	287505.936000	275.128	0.0000
Erro	8	8359.924000	1044.990500		

Variável analisada: LABIL14

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	5712.100000	5712.100000	39.570	0.0002
erro	8	1154.836000	144.354500		
Total corrigido 9 6866.936000					
CV (%) = 13.16					
Média geral: 91.3200000 Número de observações: 10					

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmonica do número de repetições (r): 5
 Erro padrão de cada média dessa FV: 5,37316480298157
 CONTRASTE NÚMERO 1

O contraste testado está apresentado a seguir:

Nível dessa Fonte de Variação	Coefficientes
S	1.0000
GEX	-1.0000

Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por 1 e os negativos por 1

Estimativa	: -47.80000000
DMS Scheffé	: 17.52290131
NMS:	: 0,05
Variância	: 57.74180000
Erro padrão	: 7.59880254
t para H0: Y = 0	: -6.290
Pr> t	: 0.000
F para H0: Y = 0	: 39.570
Pr>F	: 0.000
Pr exata Scheffé	: 0.000

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste	1	5712.100000	5712.100000	39.570	0.0002
Erro	8	1154.836000	144.354500		

Variável analisada: MODLABIL15

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	83247.376000	83247.376000	118.584	0.0000
erro	8	5616.080000	702.010000		
Total corrigido 9 88863.456000					
CV (%) = 10.02					
Média geral: 264.4800000 Número de observações: 10					

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmonica do número de repetições (r): 5
 Erro padrão de cada média dessa FV: 11,8491349895256
 CONTRASTE NÚMERO 1

O contraste testado está apresentado a seguir:

Nível dessa Fonte de Variação	Coefficientes
S	1.0000
GEX	-1.0000

Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por 1 e os negativos por 1

Estimativa	: -182.48000000
DMS Scheffé	: 38.64225846
NMS:	: 0,05
Variância	: 280.80400000
Erro padrão	: 16.75720740
t para H0: Y = 0	: -10.890
Pr> t	: 0.000
F para H0: Y = 0	: 118.584
Pr>F	: 0.000
Pr exata Scheffé	: 0.000

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste	1	83247.376000	83247.376000	118.584	0.0000
Erro	8	5616.080000	702.010000		

Variável analisada: NAOLABIL16

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	29626.249000	29626.249000	105.043	0.0000
erro	8	2256.320000	282.040000		
Total corrigido 9 31882.569000					
CV (%) = 6.34					
Média geral: 264.8900000 Número de observações: 10					

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmonica do número de repetições (r): 5
 Erro padrão de cada média dessa FV: 7,5105259496927
 CONTRASTE NÚMERO 1

```

-----
O contraste testado está apresentado a seguir:
-----
Nível dessa Fonte de Variação  Coeficientes
-----
S                               1.0000
GEX                             -1.0000
-----
Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por
1 e os negativos por 1
-----
Estimativa      : -109.86000000
DMS Scheffé     : 24.49323812
NMS:            : 0,05
Variância       : 112.81600000
Erro padrão     : 10.62148765
t para H0: Y = 0 : -10.249
Pr>|t|          : 0.000
F para H0: Y = 0 : 105.043
Pr>F            : 0.000
Pr exata Scheffé : 0.000
-----

```

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste	1	29626.249000	29626.249000	105.043	0.0000
Erro	8	2256.320000	282.040000		

Variável analisada: TOTAL17

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
IDENTIFI	1	287505.936000	287505.936000	275.128	0.0000
erro	8	8359.924000	1044.990500		
Total corrigido	9	295865.860000			
CV (%) =	5.21				
Média geral:	620.7000000	Número de observações:	10		

Contraste para a FV IDENTIFI

Média harmonica do número de repetições (r): 5
 Erro padrão de cada média dessa FV: 14,4567665817776
 CONTRASTE NÚMERO 1

```

-----
O contraste testado está apresentado a seguir:
-----
Nível dessa Fonte de Variação  Coeficientes
-----
S                               1.0000
GEX                             -1.0000
-----
Obs. Valores dos coeficientes positivos foram divididos por
1 e os negativos por 1
-----
Estimativa      : -339.12000000
DMS Scheffé     : 47.14623568
NMS:            : 0,05
Variância       : 417.99620000
Erro padrão     : 20.44495537
t para H0: Y = 0 : -16.587
Pr>|t|          : 0.000
F para H0: Y = 0 : 275.128
Pr>F            : 0.000
Pr exata Scheffé : 0.000
-----

```

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS CONTRASTES

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Contraste	1	287505.936000	287505.936000	275.128	0.0000
Erro	8	8359.924000	1044.990500		