

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”**

**REMINERALIZAÇÃO DE SOLOS SOB APLICAÇÃO DE AGROMINERAIS
SILICÁTICOS COM ÊNFASE NO SUPLEMENTO DE POTÁSSIO**

FERNANDO HENRIQUE DA SILVA

Monografia apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo como parte dos requisitos exigidos para a conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos de Azevedo.

**PIRACICABA
2021**

TERMO DE APROVAÇÃO

REMINERALIZAÇÃO DE SOLOS SOB APLICAÇÃO DE AGROMINERAIS SILICÁTICOS COM ÊNFASE NO SUPLEMENTO DE POTÁSSIO

Monografia apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos exigidos para a conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Florestal.

Professor Doutor Antônio Carlos de Azevedo
Orientador: Departamento de Ciências do Solo (LSO/ESALQ/USP)

Professor Doutor José Leonardo Gonçalves
Departamento de Ciências Florestais (LCF/ESALQ/USP)

Dra. Clécia Cristina Barbosa Guimarães
Pesquisadora da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME)

Piracicaba, 23 de julho de 2021

À
Maria.
Dedico.

A Antônio Carlos de Azevedo e João José Cardinali Ieda
Ofereço

Agradecimentos

À minha mãe, por acreditar, ter paciência e rezar todos os dias pela minha conquista acadêmica e profissional. Aos meus irmãos que sempre acreditaram que a minha formação acadêmica sendo pioneira no nosso círculo familiar se refletisse nas futuras gerações de seus filhos, incentivando-os a seguir os mesmos passos alterando com isso o grave histórico da ausência de estudos completos na família.

Aos meus amigos (as) e parceiros (as) que estiveram e dividiram comigo esta caminhada universitária, passando por momentos difíceis, felizes e com muitos aprendizados em diversos aspectos da vida.

Aos professores que fizeram muita diferença na minha vida acadêmica, compartilhando de todo o conhecimento e experiência em carreira, contribuindo diretamente com minha formação.

Às duas das pessoas mais importantes para meu crescimento acadêmico: Antônio Carlos de Azevedo e João José Cardinali Ieda, por acreditarem no meu potencial, me dar suporte quando preciso e acima de tudo por compartilharem um imenso conhecimento a respeito do que é fazer pesquisa dentro da Universidade Pública e os desafios e conquistas da vida, seja ela acadêmica e profissional. Com carinho, admiração e respeito, agradeço a ambos fortemente pela orientação e amizade.

Aos membros do grupo GPMSO, que contribuíram sempre que precisei de ajudas na condução do experimento, dicas e compartilhamento de estudos.

Aos técnicos e todos os profissionais que exercem funções dentro do campus da ESALQ.

Às assistentes sociais do campus.

E com amor e carinho à amizade que mais surtiu efeito desde o primeiro momento, um agradecimento mais que especial a Clécia Cristina. Amiga, parceira, conselheira.

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
1 INTRODUÇÃO	7
2 JUSTIFICATIVA	9
3 OBJETIVOS	9
3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
4 MATERIAIS E MÉTODOS	10
4.1 INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO	10
4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	12
4.3 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	13
4.4 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DO SOLO	14
4.5 AGROMINERAIS SILICÁTICOS	15
4.5.1 FONOLITO	15
4.5.2 BASALTO	15
4.5.3 DIABÁSIO	16
4.6 CARACTERÍSTICAS DAS PLANTAS	16
4.7 COLETA E PROCESSAMENTO DE DADOS	17
4.8 ANÁLISES DE LABORATÓRIO	18
4.9 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	18
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	19
5.1 LIXIVIADO	19
5.2 TROCÁVEIS	31
6. CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

RESUMO

Remineralização de solo sob aplicação de agrominerais silicáticos com ênfase no suplemento de potássio

Grandes áreas no estado de São Paulo se encontram com pastagens degradadas ou com produções agrícolas onerosas. Muito se deve ao fato de que estas áreas se encontram sobre solos de baixa fertilidade, naturais ou por causas antrópicas. Geralmente são solos com lixiviação intensa, favorecendo a perda dos fertilizantes solúveis sintéticos. Uma alternativa potencial é o uso de agrominerais silicáticos como forma insumo agrícola. O presente estudo teve por objetivo avaliar o efeito de agrominerais silicáticos nas propriedades químicas do solo, através da análise dos principais cátions da nutrição de plantas, no lixiviado e na fase trocável. O experimento consistiu na aplicação de três tipos de agrominerais silicáticos (Fonolito, Basalto, Diabasio) e um fertilizante solúvel (KCl) em dois solos de textura arenosa provenientes de áreas sob pastagem no Planalto Ocidental Paulista. A condução ocorreu em 184 dias em casa de vegetação na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, com coletas mensais de lixiviados. Também foram determinados os elementos trocáveis ao final do experimento. Os tratamentos resultaram efeitos significativos, embora o tratamento KCl tenha efeito bastante contrastante em relação aos agrominerais silicáticos, devido à natureza iônica da composição do primeiro em relação à natureza covalente dos demais. No experimento, todos os vasos (exceto T0 controle) receberam 1.3 g de K por vaso (independente do tratamento). No tratamento KCl, entre 17.23% (solo Ag) e 20.99% (Solo Av) foram perdidos por lixiviação, enquanto nos tratamentos com agrominerais as perdas ficaram entre 0.36% (T2 e T4, solo Av) e 1.84% (T4, solo Ag) do total aplicado, isto é, entre 10 a 60 vezes menores que no KCl.

Palavras chave: fertilidade do solo, mineralogia, lixiviado, potássio, pastagem

ABSTRACT

Soil remineralization under application of silicate agrominerals with emphasis on potassium supplement

Large areas in São Paulo State are degraded pastures or require expensive amendments to be brought to full production. This is so because these activities are being developed over soils of low fertility, frequently further depressed by anthropic use. The sandy nature of these soils implies intense leaching that favors the loss of synthetic soluble fertilizers. An alternative to such scenario is the use of silicate agrominerals (rock powders) as a form of soil remineralization. The objective of this study was to evaluate the effects of different sources of silicate agrominerals, quantifying its contribution to the leachate and to the soil fertility. The experiment tested three different types of rock powder and KCl (fertilizer) in two soils with similar textures from the Western Plateau Paulista (Planalto Ocidental Paulista). The experiment last for 184 days in a greenhouse at the “Luiz de Queiroz” School of Agriculture, USP. Leachate events were done monthly, and the main elements of agronomic and forestry interest were measured in them. The exchangeable elements were also measured in soil samples taken from the pots at the end of the experiment. The treatments resulted in significant effects, although the KCl treatment has a very contrasting effect as compared to the silicate agrominerals. The highest K content in the leachate was found in the KCl source, but the rock powders significantly contributed elements into the leachates in the two soils. Each pot (except those in T0 control) received 1.3 g of K per vessel (regardless of treatment). In the T1-KCl treatment, between 17.23% (Soil Ag) and 20.99% (Soil Av) were lost by leaching, while in the treatments with agrominerals the losses were between 0.36% (T2 and T4, Soil Av) and 1.84% (T4, soil Ag) of the total applied, that is, between 10 and 60 times smaller than the KCl treatment.

Key words: soil fertility, mineralogy, leachate, potassium, pasture

1. INTRODUÇÃO

Os solos utilizados com pastagens no Planalto Ocidental Paulista (POP) são em sua maioria arenosos e com pouca reserva mineral (Chiarini et al., 1967; Rossi 2017) e, portanto, possuem baixa capacidade de sustentação da produção e são bastante susceptíveis à erosão, se expostos à ação das chuvas.

A pecuária brasileira apresenta a maior parte do rebanho criado a pasto (Ferraz; Felício, 2010), que se constitui na forma mais econômica e prática de produzir e oferecer alimentos aos bovinos. Devido às facilidades de implantação de pastagens no País, há uma tradição de pequeno investimento e pouco uso de tecnologias e de insumos na formação e no manejo de grande parte das pastagens brasileiras (Dias-Filho, 2014). A principal consequência dessas práticas tem sido a alta incidência de pastagens degradadas no País e o crescente conflito entre demandas ambientais e de mercado nos últimos anos com abertura de novas áreas de produção animal expandindo-se para regiões importantes como a Amazônia. A resolução deste conflito requer novas tecnologias e atitudes do setor pecuário visando a melhorar a qualidade dos pastos em regiões já consolidadas, mas que se encontram com baixos nível de produtividade ou abandonadas (Dias-Filho, 2014).

O aporte de materiais de baixo custo, menos solúveis, visando a melhoria dos solos sob pastagem é uma alternativa para melhorar as condições edáficas e a qualidade do pasto. Pastagens de melhor qualidade podem suportar uma maior densidade de animais e os solos estariam mais protegidos contra os processos erosivos. Além disto, situam-se mais próximas dos centros consumidores e dos portos para exportação, reduzindo a emissão de carbono com transporte por longas distâncias.

Uma alternativa potencial para melhoria deste cenário é o emprego de agrominerais silicáticos (pós de rocha) como insumo agrícola. A rochagem (*rocks for crops*), termo utilizado para designar a aplicação e manejo com agrominerais silicáticos, ganhou *momentum* no Brasil após a aprovação da Legislação regulamentando e instruindo o registro destes produtos no MAPA pela Lei 12.890 de 10/12/2013 (DOU, 2013). Apesar desta conquista, várias rochas já eram usadas, inclusive registradas em outras categorias de insumo. Os agrominerais silicáticos são constituídos por rochas moídas e peneiradas, sem nenhum tratamento químico ou térmico, podendo ser registrados no MAPA como condicionadores de solo, fertilizantes ou remineralizadores, dependendo de suas características. Agrominerais silicáticos é um termo empregado para pós de rochas silicáticas

enquanto o termo *remineralizador* é preferencialmente utilizado apenas para os agrominerais que estejam assim registrados no MAPA. Segundo Carvalho (2013), os agrominerais silicatados liberam lentamente os elementos químicos, reduzindo as perdas por lixiviação e tamponando a concentração de nutrientes no solo por mais tempo, embora em concentrações menores que os fertilizantes. Em geral, os agrominerais silicáticos possuem composição química e mineralógica mais complexas que os fertilizantes, sendo estes últimos geralmente sólidos de natureza iônica e com pequena variação de elementos químicos em sua composição. Os agrominerais silicáticos, por outro lado, são compostos por uma assembleia mineralógica variada como biotita, flogopita, feldspatoides, feldspatos, minerais máficos, que são compostos por ampla variedade de elementos como K, Ca, Mg, Si, Fe, Na, Co, Cu e outros mais, a depender de sua área-fonte, e que pode se comportar de maneira diversa em função das condições físico-químicas e microbiológicas dos solos onde são aplicadas e das plantas neles cultivadas (Nascimento e Lápido-Loureiro, 2004; Martins et al., 2008; Ribeiro et al., 2010; Guelfi-Silva et al., 2012 apud Souza et al. 2017).

Portanto, esse processo de remineralização de solo com uso de agrominerais silicáticos possui potencial para melhorar o desempenho da pecuária e de outros sistemas de produção pois possuem pequeno custo e são fontes multinutrientes de liberação lenta (Carvalho, 2013).

Estudos anteriores testaram o uso desta alternativa, como os de Coroneos et al.(1996) e Hinsinger et al.(1996) que obtiveram respostas positivas com a aplicação de agromineral de granito, enquanto Silva et al. (2008) e Welter et al. (2011) obtiveram respostas semelhantes utilizando basaltos. No entanto, nenhum ou reduzido efeito no solo e no crescimento de plantas foram observados por Kudla et al. (1996), Bolland ; Baker (2000), Boniao et al. (2002) e Escosteguy; Klamt (1998), sendo necessário, muitas vezes, doses de pó de rocha extremamente elevadas ou economicamente inviáveis (Bolland ; Baker, 2000).

Portanto, para avaliar corretamente o potencial de usos de agrominerais silicáticos como fonte de multinutrientes, é necessário avançar no entendimento da dissolução dos minerais constituintes de rochas aplicadas aos diferentes solos, para correta identificação das combinações agromineral silicático-solo-cultura-clima que possam ser economicamente viáveis na melhoria das condições de produção de setores importantes como a produção pecuária do Planalto Ocidental Paulista bem como de outras regiões sob a condições semelhantes.

2. JUSTIFICATIVA

Solos do Planalto Ocidental Paulista (POP) são predominantemente arenosos, resultado da alteração dos arenitos do Grupo Bauru. Estes solos se degradam facilmente pela erosão, o que ocorre em vastas áreas principalmente sob pastagens, mas também com cultivo de cana e reflorestamento. A erosão é causada principalmente pela deficiente cobertura vegetal, por sua vez resultado da pobreza de nutrientes e irregularidade na distribuição de chuvas. Usuários destes solos são desencorajados à aplicação de insumos pelo alto preço e pela pequena capacidade de retenção de nutrientes do solo, aumentando as perdas por lixiviação. Neste cenário, o uso de remineralizadores pode ser interessante pelo seu pequeno custo e liberação de elementos de forma lenta. Neste trabalho foram aplicados 3 agrominerais silicáticos (fonolito, basalto e diabásio) em dois solos coletados no POP, com vistas a oferecer subsídios para avaliação destes materiais como insumo para as pastagens na região.

3. OBJETIVOS

Este projeto de pesquisa tem por objetivo avaliar as modificações produzidas em solos arenosos, coletados sob pastagens na região do Planalto Ocidental Paulista (POP), pela aplicação de rochas diversas, na presença da cultura da *Brachiaria*.

3.1. Objetivos Específicos

- Avaliar a contribuição de diferentes agrominerais silicáticos para melhoria na disponibilidade de nutrientes na solução do solo, no contexto de solos de texturas arenosas.
- Comparar as lixiviações entre tratamentos em um período de 6 meses e entender como os elementos foram sendo liberados, com ênfase ao potássio.
- Analisar os possíveis efeitos secundários no solo após aplicação dos agrominerais silicáticos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação e contou com tratamentos sob aplicação de cloreto de potássio e três diferentes tipos de agrominerais silicáticos, sendo um com mesma composição, mas com granulometrias diferentes. Foram utilizados solos coletados em áreas de pastagem no Planalto Ocidental Paulista (POP) e com presença de gramíneas. Os resultados observados se referem aos elementos trocáveis no solo e na lixiviação dos vasos.

4.1. Instalação do experimento

Na instalação do experimento, foram utilizadas amostras de Neossolos Quartzarênicos coletados em duas localidades do Planalto Ocidental Paulista, nas cidades de Agudos-SP (Ag) (sob transição pastagem para cana de açúcar) e Avaí-SP (Av) (sob pastagem) (Figura 1).

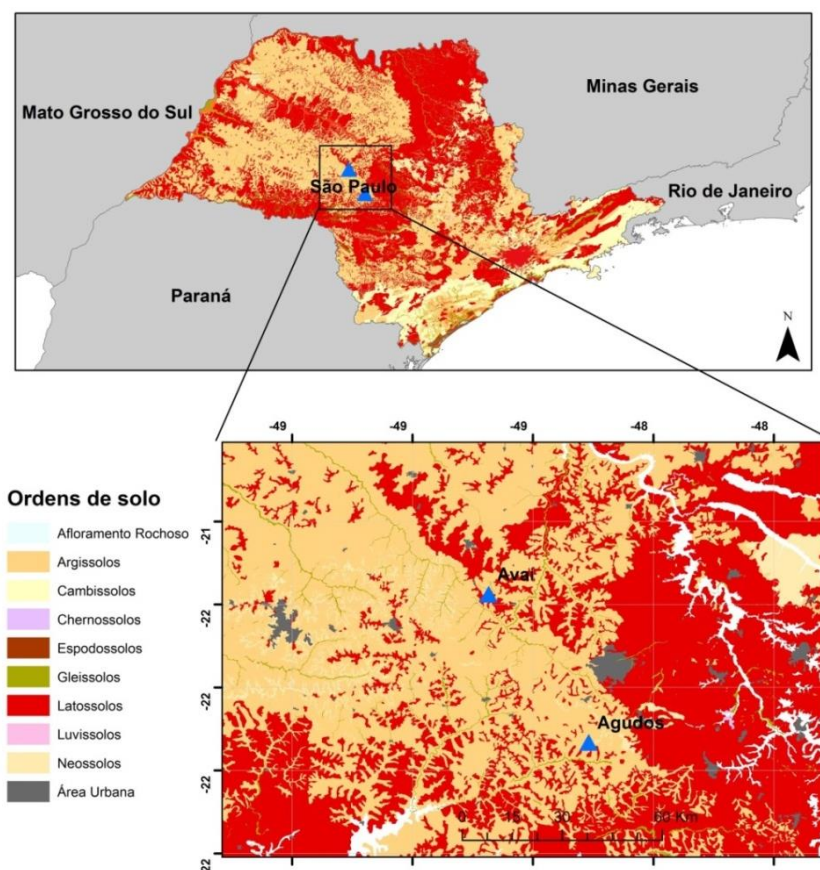


Figura 1. Localização das áreas fonte dos solos utilizados. Avaí ($22^{\circ}08'22,6''S$, $49^{\circ}24'06,0''W$) e Agudos ($22^{\circ}31'54,9''S$, $49^{\circ}07'49,8''W$). Escala 1:1.000.000. Coordenadas geográficas WGS84

Fonte: Rossi (2017)

Em cada local foi aberto uma minitrincheira de 1,5 x 1,0 x 0,20 metros para que 300 kg de solo do horizonte A de cada solo pudesse ser coletados; a demarcação da área foi realizada com auxílio de trena e estacas. Em cada local foram realizadas tradagens compostas (em três pontos cada) nas camadas de solo de 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm, 80-100 cm e 100-120 cm (Figuras 2a, b, c) para caracterização do solo.

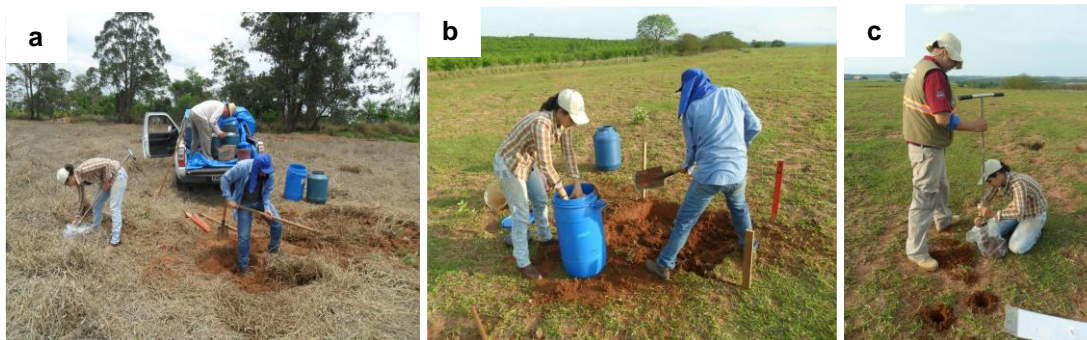


Figura 2. a. Abertura de trincheiras (Agudos-SP); b. Coleta de solo (Avaí-SP); c. Tradagem (Avaí-SP).

Fonte: GPEMSO

Todo o solo foi seco ao ar e peneirado. A secagem foi realizada em casa de vegetação da ESALQ/USP (Figura 3a), sendo possível a secagem de pouco mais de 100 kg por vez, com duração de uma semana em média. Ambos os processos levaram cerca de um mês para realização (19/10/2016 à 23/11/2016). Após a secagem o material amostrado foi transferido para uma segunda casa de vegetação, onde foi conduzido o experimento (Figura 3b).

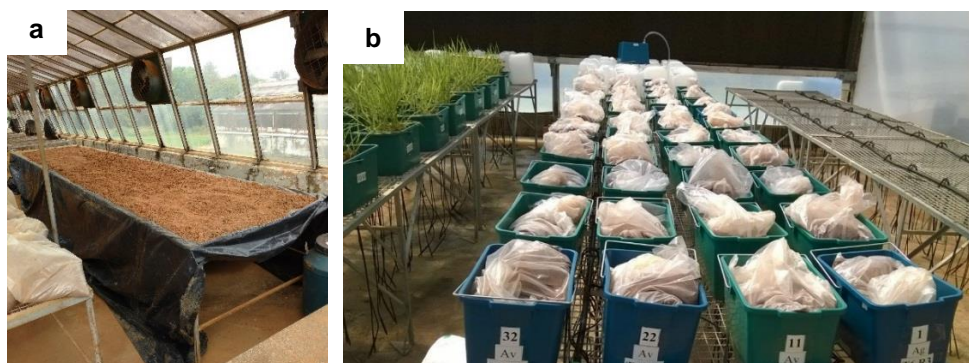


Figura 3. a. Secagem do solo; b. Transferência para casa de vegetação.

Fonte: GPEMSO

Foram realizadas adaptações prévias em vasos de 10 litros contendo orifícios de modo a realizar as coletas dos lixiviado e irrigação manual (Figura 4). Os vasos foram preenchidos com solo até a altura de 10 cm.



Figura 4. a. Alocação dos vasos sob nas bancadas; b. Galões abaixo dos vasos para armazenamento dos lixiviados; c. Detalhes do sistema de balança para pesagem dos vasos.

Fonte: GPMSO

4.2. Delineamento experimental

O delineamento ocorreu em blocos casualizados, sendo aplicados 6 tratamentos: fonte solúvel de cloreto de potássio, KCl (T1), fonolito 200 Mesh (T2 e T6), fonolito 4 Mesh (T2), pós de basalto (T4), pó de diabásio (T5) e controle (T0). Foram realizadas três repetições para cada tratamento e no T6 foi aplicado fonolito 200 Mesh, mas não houve lixiviação (Tabela 1).

Os solos foram pesados e colocados em sacos plásticos. A dose de insumo foi então adicionada e o saco agitado até obter-se uma mistura homogênea. Em seguida, os solos foram despejados dos sacos para o interior vasos. As quantidades aplicadas seguiram como critério base o aumento no teor de potássio no solo afim de atingir a necessidade nutricional da planta para o elemento. Os teores calculados de K_2O necessários para elevar o K no solo foram da ordem de $0,4 \text{ Mg.ha}^{-1}$. Como cada agromineral tem porcentagens de K_2O diferentes em sua composição, os teores aplicados de cada um variaram, mas seguiram todos o critério para K_2O (Tabela 1).

Após a aplicação, os solos foram homogeneizados e umedecidos com água deionizada até atingir a capacidade de campo.

Tabela 1. Especificação dos tratamentos

Tratamentos	Especificação	Lixiviação	Massa de insumo aplicadas (g.vaso ⁻¹)	Mg.ha ⁻¹	Mg K ₂ O.ha ⁻¹
T0	Testemunha	+	-	-	-
T1	Cloreto de Potássio	+	2,6	0,7	0,42
T2	Fonolito 200 mesh	+	19,5	5,07	0,41
T3	Fonolito 4 mesh	+	20,2	5,25	0,42
T4	Pó de basalto	+	104	27,04	0,41
T5	Pó de diabásio	+	85	22,10	0,40
T6	Fonolito 200 mesh	-	19,5	5,07	0,40

4.3. Cronograma de atividades

As atividades do experimento foram iniciadas em abril de 2017 e o período apresentado neste trabalho se encerrou em setembro do mesmo ano (Tabela 2). A amostragem de solo de acordo com o cronograma seguido, foi realizada em 01/11/2017.

Tabela 2. Calendário resumido das atividades. Ano de referência 2017

Atividades (2017)	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro
Aplicação do solo/tratamento	27	-	-	-	-	-
Germinação das plantas	-	05	-	-	-	-
Irrigação semanal	-	01,15,25,31	07,19,29	07,19,25	03,16,23,31	04,14,20,29
Desbaste das plantas	-	-	20	20	18	20
Lixiviação	-	-	-	13,27	10,24	27

4.4. Características químicas e físicas dos solos

As amostras de solo secas e destorroadas foram passadas em peneira de 2 mm para obtenção da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) antes das análises físicas e químicas. As análises químicas consistiram na determinação do pH CaCl₂, MO, P, K, Mg, Ca, H+Al, SB, CTC, V%, Na, Si (Tabela 3) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Zn) (Tabela 4) e as análises físicas consistiram na determinação da granulometria do solo (Tabela 5).

Tabela 3. Concentrações química¹ dos Solos Ag e Av

Solo	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
	-	g.dm. ⁻³	mg.dm. ⁻³								%	%
Ag	4,5	13,5	4	2,4	6,5	2,5	<2	14	11,4	25,4	45	8
Av	4,4	12,5	5	2,1	3	2	<2	13	7,1	20,1	35,5	12,5

¹ Determinação por: pH em CaCl₂; P, K, Ca, Mg em Resina; Al em mol.L⁻¹; H+Al em SMP.

Tabela 4. Concentração dos micronutrientes² trocáveis nos Solos Ag e Av

	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Si	Na
			mg.dm. ⁻³			mg.kg. ⁻¹	mg.dm. ⁻³
Ag	0,16	0,45	23	16,6	0,6	2	3
Av	0,21	0,5	22	15,9	0,5	2	3

² Determinados por: B em água quente; Cu, Fe, Mn, Zn em DTPA; Si em CaCl₂ 0,01mol L⁻¹; Na em Mehlich 1.

Tabela 5. Características física granulométricas³ dos solos Agudos e Avaí

	AF	AM	AG	AT	Argila dispersa em água	Argila com dispersante	Silte	Floculação	Textura
	g kg. ⁻¹	g kg. ⁻¹	g kg. ⁻¹	g kg. ⁻¹	g kg. ⁻¹	g kg. ⁻¹	g kg. ⁻¹	%	-
Ag	484	212	18	906	37,5	62,5	31	41,5	ar
Av	480	220,5	15,5	860,5	12,5	88	51,5	83,5	ar

³ AF: Areia Fina; MF: Areia média; MG: Areia grossa; AT: Areia total.

4.5. Agrominerais silicáticos

A composição química dos elementos totais presentes nos agrominerais silicáticos foi determinada por fusão com metaborato de lítio (LiBO_2) a 1000°C , com posterior dissolução do material em solução de ácido nítrico (4%) e ácido hidrocloreídrico (2%) com posteriores leituras dos teores por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-AES) (Tabela 6).

4.5.1. Fonolito

A amostra de agromineral silicático aplicada é proveniente da região de Poços de Caldas- MG. Este material possui Feldspatos potássicos (55%), Nefelina (10 a 15%), Eugirina (10 a 15%), Eudialita (5 a 10%), e Natrolólita, Pectolita e Rinkita (5% cada). Os teores de SiO_2 e Al_2O_3 compõem a maior porcentagem da rocha, seguidos por Na_2O e K_2O , e são superiores aos outros agrominerais silicáticos aqui utilizados. Neste material não há minerais fonte de P e os teores da soma de bases na rocha são em torno de 10% ($\text{SB} = \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$; IN5, Brasil, 2016). Com objetivo de avaliar o efeito do tamanho de partícula, este agromineral silicático foi aplicado em mesh 200 (0.074 mm) e 4 (4.76 mm). A composição química foi semelhantes nas duas frações deste material (Tabela 6).

4.5.2. Basalto

A amostra de pó de Basalto é proveniente da região de Ribeirão Preto – SP. Apresenta em sua composição os seguintes minerais: plagioclásio, feldspato potássico e clinopiroxênios. Há pequenos reflexos de quartzo e de ilmenita, magnetita e titanomagnetita nos difratogramas (não apresentados). Conforme se observa na Tabela 6, os índices soma de bases da rocha (SB) foram de 1 a 2% maiores que aqueles do fonolito (Tabela 6) (Brasil, 2016). O teor de potássio também atende aos critérios (Brasil, 2016), pois são superiores a 1%. O teor de potássio, ferro e manganês também atende aos critérios para remineralizador da IN5 (Brasil, 2016), mas o teor de fósforo é baixo. O basalto é uma rocha ígnea extrusiva, básica e é pouco resistente ao intemperismo químico. É uma importante fonte de Ca, Mg e micronutrientes.

4.5.3. Diabásio

A amostra de pó de diabásio é proveniente da região de Piracicaba – SP. A composição mineralógica é constituída, em ordem decrescente, por cristais de plagioclásio, clinopiroxênio, olivina e óxido de ferro (podendo ser magnetita, ilmenita, goethita, hematita, entre outros). Não há a presença de sílica livre (quartzo). Esta mineralogia é característica do grupo de rochas ígneas básicas. Os teores de K₂O (Tabela 6) são superiores ao mínimo de 1% exigidos para registro como remineralizador (Brasil 2016) concordando com os teores comuns de K₂O presentes nos diabásios.

Tabela 6. Teores totais de elementos presentes nos agrominerais silicáticos.

Pó de rocha	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	SB
%												
Fonolito 200	56,4	20,9	3,9	0,3	0,3	1,8	6,7	8,0	0,0	2,8	101,9	10,1
Fonolito 4	55,4	20,3	3,9	0,2	0,3	1,7	6,2	7,8	0,0	3,5	99,9	9,8
Basalto	50,6	12,2	15,1	0,2	3,8	7,6	2,7	1,5	0,6	1,5	99,5	12,9
Diabásio	50,8	11,8	13,9	0,2	2,8	6,8	2,7	1,8	0,8	3,7	98,2	11,4

4.6. Características das plantas

A gramínia utilizada no experimento foi a do gênero *Brachiaria*. Família *Gramineae*, tribo *Paniceae*, gênero *Brachiaria*; A *B. decumbens* cultivar Basilisk que é adaptada para áreas tropicais úmidas de verão chuvoso, com estação seca não superior a quatro ou cinco meses. Cresce em diferentes tipos de solo, mas requer boa drenagem e boa fertilidade para o aumento da produção de massa seca; é relativamente exigente em potássio (K); trata-se de uma planta perene, com 30-60cm de altura, prostrada, emitindo raízes adventícias e brotos novos nos nós inferiores, possui folhas lanceoladas ou linear-lanceoladas, macias e densamente pilosas, a inflorescência é formada por 1-5 racemos (Embrapa, 2016).

Foram semeadas aproximadamente 10 sementes por vaso e após a brotação, procedeu-se ao raleio deixando-se 3 plântulas por vaso, em forma de triângulo.



Figura 5. a. Detalhe do sulco de semeadura das plantas; b. Disposição das plantas após germinação; c. Detalhes das plantas após o desbaste (triângulo).

Fonte: GPEMSO

4.7. Coletas e processamento dos lixiviados

Um ensaio pré-semeadura determinou os valores da capacidade de campo padrão de cada um dos solos. Desse modo, foi possível transformar a umidade em peso e aplicar cálculos de valores necessários para irrigação. Semanalmente, cada um dos vasos foi pesado e os valores de massa utilizados para determinar os volumes de água a serem irrigados para manutenção dos vasos em 22% (capacidade de campo). Com este teor de umidade, não há lixiviação nos vasos.

Os eventos de lixiviação ocorreram em intervalos de 15 dias, para os quais adicionou-se 1 litro de água ao volume necessário para atingir a capacidade de campo. Após 24 horas, o volume dos lixiviados coletados nos galões foi medido (figura 6a) e em seguida uma alíquota com cerca de 30 mL de lixiviado de cada vaso foi transferido para um recipiente (Figuras 6b), no qual foram feitas as medições de condutividade elétrica (CE), temperatura (T) e pH. Após as leituras duas gotas de ácido nítrico foram adicionadas em cada recipiente para evitar a ocorrência de precipitados e o crescimento de microrganismos e os mesmos foram refrigerados para posterior análise de lixiviado. Os galões foram lavados com solução 4% de ácido nítrico sempre entre as lixiviações.

Todas as irrigações foram feitas de forma manual, utilizando água deionizada, ao longo de todo o tempo decorrido do experimento. Contra-amostras de água utilizada em cada evento de irrigação foram armazenadas. As irrigações semanais foram, sempre que possível, realizadas nos mesmos dias da semana. O valor dos elementos determinados nas contra-amostras foi subtraído dos valores lidos nos lixiviados de cada vaso.

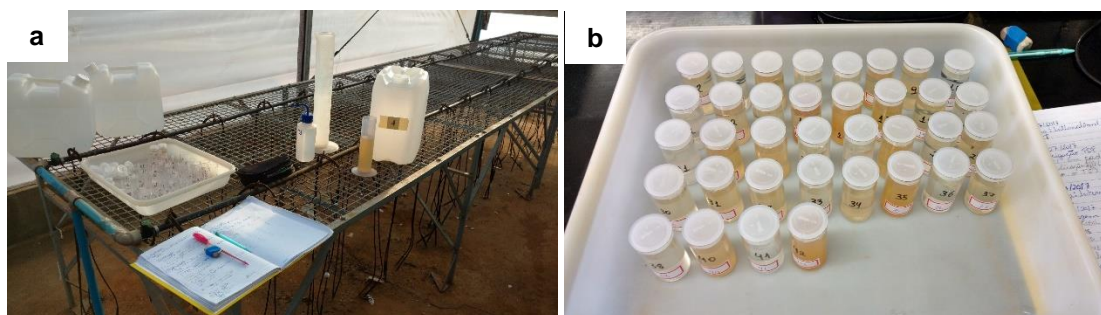


Figura 6. a.Coleta de lixiviados (medição de volume e armazenamento dos lixiviados em recipientes para posterior leitura de CE, T e pH e análise de lixiviados). b. Armazenamento.

Fonte: GPEMSO

4.8. Análises de laboratório

Para aos solos, foram realizadas amostragens aos 6 meses do experimento. Ao todo foram coletadas 4 sub-amostras de cada um dos 42 vasos. O conjunto amostral de cada vaso foi homogeneizado em uma única amostra de 175 gramas, e, após a secagem (TFSA), 50 gramas foram analisados determinando pH CaCl_2 , MO, P, K, Mg, Ca, H+Al, SB, CTC, V%, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Na e Si. Cada unidade experimental (vaso) foi analisada individualmente.

As análises do lixiviado foi realizada por espectrometria de emissão óptica com plasmas indutivamente acoplado (ICP-OES), determinando as concentrações dos elementos Al, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si, Zn (mgL^{-1}). As amostras foram analisadas no Laboratório de Análises Ambientais, Dep. Ciências do Solo, ESALQ-USP.

4.9. Análises estatísticas

Foram realizados testes para avaliação de normalidade de distribuição de erros (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variância (Breusch-Pagan). A comparação dos valores médios foi realizada pelo teste Tukey.

Uma segunda análise de correlação canônica foi realizada considerando-se as respostas dos elementos lixiviados (Al, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si, Zn) e daqueles presente no complexo de troca (pH, M.O, P, K, Ca, Mg, Al, H.Al, CTC, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Si, Na) em função das combinações de Solo e Tratamento. Utilizando a variável canônica 1, realizou-se uma ANOVA, avaliando assim os efeitos principais de Solo e Tratamentos, bem como os efeitos de interação.

Os resultados dos testes estatísticos serão apresentados da seguinte forma:

Testes estatísticos (ANOVA, Tukey) individuais para cada um dos elementos respostas do lixiviado e trocável, considerando os efeitos da interação entre:

Solo dentro de cada Tratamento

Tratamento dentro de cada Solo

Análise multivariada de Correlação Canônica 1 e 2 para cada um dos elementos respostas do lixiviado e trocável, considerando os efeitos da interação entre:

Solo dentro de Cada Tratamento

Tratamento dentro de cada Solo

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. LIXIVIADO

O volume de lixiviado, na média entre os solos, foi por volta de 18 litros em 6 meses (15.6 L para Av e 21.7 L para Ag). Considerando o volume acumulado por coleta no Solo Ag os tratamentos T2 > T5 e T1 foram os que mais lixiviaram (Figura 1a), para o solo Av tem-se T0 > T3 > T4 (Figura 1b). Na comparação entre os dois solos (Figura 1c), o Solo Ag se mostrou com valores superiores ao Av, com a diferença chegando a 6 litros entre ambos. Este resultado é interessante porque o Solo Av possui maior quantidade de argila e maior CTC que o Solo Ag (Tabela 3), embora a diferença foi pequena. Este resultado sugere que, apesar desta semelhança, a dinâmica nos dois solos foi diferente. É possível que o teor inicial de Ca no Solo Ag, mais que o dobro do solo Av (Tabela 3), tenha favorecido o desenvolvimento radicular e a re-agregação do solo nos vasos, após a desagregação durante o processo de secagem do solo e montagem dos vasos.

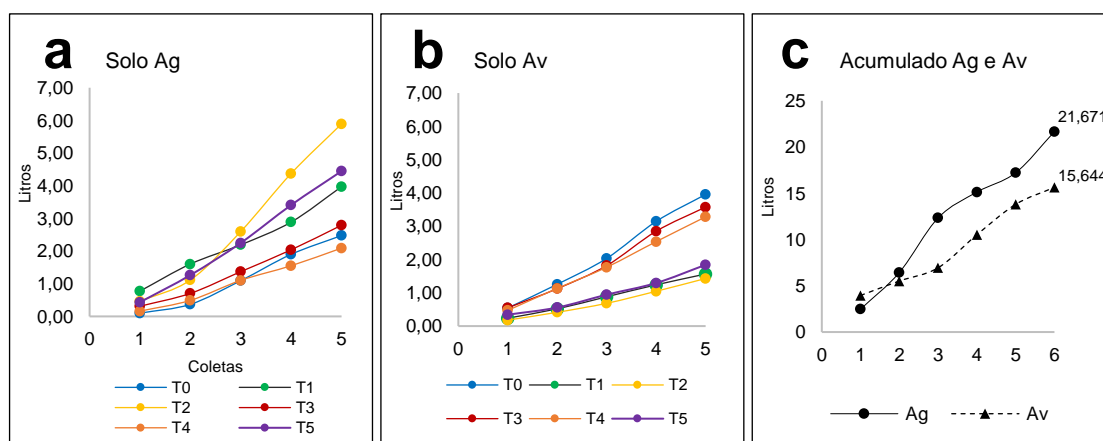


Figura 7. Volume de lixiviado, Solos Ag e Av

Observa-se os altos teores de Na nos tratamentos com fonolito e de Ca, Mg e K no tratamento KCl (Tabela 7 e 8).

Tabela 7. Total de elementos lixiviados no Solo Ag

Tratamento	Al	Na	Si	P	Cu	Zn	Fe	Ca	Mg	K	Total
mg.vaso ⁻¹											
T0	2,5	1,2	1,8	0,2	0,0	0,1	0,5	6,6	2,6	6,5	22,0
T1	1,9	3,9	2,7	0,1	0,0	0,2	0,4	70,2	40,4	234,3	354,1
T2	6,0	64,0	13,4	0,3	0,1	0,1	2,5	4,6	1,3	14,2	106,5
T3	3,0	21,5	4,4	0,2	0,0	0,1	0,8	6,5	3,2	15,5	55,2
T4	4,1	21,1	4,9	0,2	0,0	0,1	1,2	7,6	4,1	23,8	67,1
T5	2,1	5,3	2,9	0,1	0,0	0,1	0,8	11,9	4,1	13,0	40,3

Tabela 8. Total de lixiviados no Solo Av

Tratamento	Al	Na	Si	P	Cu	Zn	Fe	Ca	Mg	K	Total
mg.vaso ⁻¹											
T0	2,0	0,9	2,5	0,1	0,0	0,1	1,0	9,7	7,0	2,4	25,7
T1	1,1	7,4	1,7	0,1	0,0	0,2	0,2	171,4	175,4	285,5	643
T2	4,3	50,6	7,1	0,2	0,0	0,1	2,2	12,4	8,0	4,6	89,5
T3	2,5	10,5	3,5	0,1	0,0	0,1	1,1	15,9	7,6	5,5	46,8
T4	1,7	7,9	2,2	0,1	0,0	0,1	1,0	19,4	17,9	4,6	54,9
T5	2,4	6,8	3,6	0,1	0,0	0,1	1,0	32,3	19,2	10,3	75,8

No que tange à dissolução dos agrominerais silicáticos, uma estimativa grosseira desta transformação pode ser feita observando-se os valores totais de elementos lixiviados, após descontarmos o total lixiviado no tratamento controle (T0). Se apenas diferenças acima de 1 mg vaso⁻¹ forem consideradas, somente Ca e Mg no Solo Ag, tratamento T2 (fonolito 200) lixiviaram menos que o tratamento controle (T1) para este solo. Deve-se ressaltar que o teor dos elementos nos lixiviados é uma subestimativa da dissolução da rocha, já que parte dos elementos dissolvidos foram absorvidos pelas plantas e parte para o complexo de troca, isto é, o sistema possui duas saídas (planta e lixiviado) e um buffer (CTC). Daí inferirmos que nestes 6 meses houve contribuição da dissolução dos agrominerais silicáticos. No entanto, a variância não foi homogênea, e por isto os dados foram transformados antes da análise estatística, o que será comentado mais à frente.

A semelhança química (Tabela 3 e Tabela 4) e física (Tabela 5) entre os dois solos também se manifestou no teor total de elementos lixiviados no controle, sendo 22 mg vaso⁻¹ para o solo Ag e 25 mg vaso⁻¹ para o solo Av (Tabela 7 e 8). No entanto, é interessante notar que os solos responderam de maneira bastante diferente à aplicação dos insumos. Para o Tratamento T1 (KCl), o total lixiviado foi quase o dobro no solo Av (643 mg) em comparação com o solo Ag (354,1 mg), o que a torna mais acentuada ainda se considerarmos que o volume de lixiviado no solo Av foi menor (15.64 L, Figura 7) que o do solo Ag (21.67 L, Figura 7). Logicamente a grande diferença no total da massa lixiviada no T1 (KCl) é devido à sua solubilidade enorme em comparação com os pós de rocha. Neste sentido, 66.17% do total da massa lixiviada no Ag e 44.4% no Av são devidos ao K solúvel, nos respectivos T1.

Considerando apenas os tratamentos com agrominerais silicáticos, para o solo Ag, o total lixiviado foi T2>T4>T3>T5. Para o solo Av, T2>T5>T4>T3. Isto demonstra a grande solubilidade do Fonolito 200 (T2) em ambos os solos, principalmente relativo aos minerais sódicos. O Na contribuiu com mais da metade do total dos valores lixiviados em ambos os solos.

O efeito de tamanho de partícula do agromineral também foi bastante importante. Apesar da mesma composição, o tamanho muito maior das partículas do T3 (4.73 mm) resultou na menor dissolução no solo Av (46.8 mg vaso⁻¹) e penúltima no solo Ag (55.2 mg vaso⁻¹), ambos aproximadamente 50% menor que a mesma rocha em granulometria mesh 200 (0.074mm) (T2). O Basalto e o Diabásio também se dissolveram em proporções diferentes nos dois solos, embora a diferença não tenha sido grande. No solo Ag, o Basalto (T4) dissolveu um pouco mais (67.1 mg vaso⁻¹) que o Diabásio (T5) (Tabela 6), enquanto no solo Av o Diabásio (T5) dissolveu mais (75.8 mg vaso⁻¹) que o Basalto (T4) (54.89 mg vaso⁻¹) (Tabela 8). Em ambos os casos, a diferença foi de 20 mg vaso⁻¹ aproximadamente. Ainda considerando apenas os agrominerais silicáticos, o total lixiviado foi maior no solo Ag para todas os agrominerais silicáticos, exceto o Diabásio no solo Av (Tabela 7 e 8).

Efeitos da interação entre Solo dentro de cada Tratamento para os elementos lixiviados.

Os resultados dos testes paramétricos da quantidade de elementos lixiviados (Tabela 9) mostram que houve efeito da interação na relação do Solo dentro de cada Tratamento, para todos os elementos apresentados em ambos os solos ao nível de pelo menos 5% de significância, exceto para Fósforo (P) e Cobre (Cu) no solo Av (Tabela 9).

Tabela 9. Efeito da interação entre Solo dentro de cada Tratamento para os elementos lixiviados (ANOVA).

Elementos	Solo Ag	Solo Av
Al	0,000406 ***	0,047916 *
Na	$8,12 \cdot 10^{-11}$ ***	$1,65 \cdot 10^{-07}$ ***
Si	0,000133 ***	0,045017 *
P	0,037878 *	0,331003
Cu	0,000609 ***	0,387226
Zn	0,01330 *	0,02835 *
Fe	$7,90 \cdot 10^{-05}$ ***	0,00481 **
Ca	0,000233 ***	0,004180 **
Mg	0,00164 ***	0,002850 **
K	$9,43 \cdot 10^{-10}$ ***	$1,03 \cdot 10^{-09}$ ***

Legendas: níveis de significância 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '*' 0.1 '.' 1

Efeitos da interação entre Tratamento dentro de cada Solo para os elementos lixiviados.

A partir dos resultados que tiveram interação (Tabela 9), foi considerando o teste de Tukey (5% de significância), para comparação das diferenças que ocorrem dentro dos tratamentos para cada elemento (Figura 8).

Dentre os tratamentos com pó de rocha, os resultados de Alumínio, Sódio e Silício mostram que o tratamento T2 foi o que mais contribuiu para a diferenciação entre os tratamentos, em ambos os solos (Figura 8a, 8b e 8c). Estes resultados estão associados à dissolução de minerais silicáticos ricos em Na, que são muito solúveis e fazem parte da composição mineralógica desta rocha.

Outros estudos do nosso grupo (GPEMSO – ESALQ- USP), em colunas de lixiviação, resultaram padrões semelhantes de liberação de Na, porém registrados a partir de pós de diabásio (Silva, 2016), corroborando com Crundwell (2015), que verificou a rápida

dissolução de Na da estrutura cristalina dos minerais, bem como a série de mobilidade iônica de Polynov-Hudson (1985).

Não houve liberação significativamente diferente de K a partir das rochas (Figura 8f), em parte porque a enorme solubilização de K no tratamento T1 (KCl) aumentou muito a diferença mínima necessária para o limite de significância (Figura 8f), e em parte porque o fonolito possui vários minerais com Na, mas sem K, que estão se solubilizando primeiro. Apesar do alto teor de K, o fonolito possui minerais com ausência de K em sua composição: Eurigina (Na_2O : 13,42%, Fe_2O_3 : 6,92%, SiO_2 : 52,02%), Pectolita (Na_2O : 9,32%, Ca_2O : 33,74%, SiO_2 : 54,23%), Rinkita (Na_2O : 9,44%, CaO : 27,34%, SiO_2 : 29,30%) e Natrolina (SiO_2 : 47,60%, Al_2O_3 27,40%, Na_2O 15,36%), que juntos somam em torno de 30% da sua composição. É provável que, na continuidade das lixiviações por período mais longo, teríamos o esgotamento do KCl como fonte de K no T1, e os minerais fonte de K nos outros tratamentos com rochas contribuindo mais para o K lixiviado.

Os macronutrientes Ca, Mg e K, que são exigidos em maiores quantidades pelas plantas (Novais et al., 2007), foram lixiviados em maior quantidade no tratamento T1 (KCl). Este fertilizante possui grande solubilidade, podendo ser até 58% solúvel em água (Resende et al. 2006). Observações semelhantes foram obtidas por Duarte et. al. (2013).

Este aumento da atividade de K em solução no T1 provocou o deslocamento de outros íons das superfícies de troca, isto é, da CTC do solo. Geralmente os íons mais afetados são o Ca e o Mg, conforme ocorreu neste experimento (Figura 8f). Tais perdas induzidas pelo K seguem a mesma tendência observada em ambos os solos, isto é, são maiores nos tratamentos com KCl (Figuras 8d, 8e).

As razões entre as perdas de Ca e Mg pelo Solo Av e pelo solo Ag são semelhantes entre os controles ($\text{Av/Ag}=1.54$ para Ca e $\text{Av/Ag}=2.59$ para Mg) e os tratamentos com T1 ($\text{Av/Ag}=1.99$ para Ca e $\text{Av/Ag}=3.07$ para Mg). Estas razões se mostraram maiores para o Solo Av em aproximadamente o dobro para Ca e 3,5 vezes para o Mg. Para K, há o aumento gigantesco (mais de 30 vezes) de K no solo causado pela adição de KCl, neste caso, as razões não se mantêm ($\text{Av/Ag}=0.32$ para o Controle e $\text{Av/Ag}=1.05$ para o tratamento T1) (Figura 8d, e,8f).

Para Ferro, ambos os solos tiveram interação significativa (Tabela 9). Este efeito foi maior, ao nível de tratamento, no T2 quando comparado aos demais (Figura 8h), mesmo tendo este tratamento um teor menor em concentração dos agrominerais silicáticos do que os tratamentos T3 e T4 com 2,5 vezes maior (Tabela 3). Este resultado não pode ser satisfatoriamente explicado com os resultados apresentados aqui. Hipóteses para

este resultado podem considerar micrositios de redução, estímulo pela dissolução do fonolito à produção de agentes quelantes e complexantes no solo (talvez estimulados pelo alto teor de Na), entre outras.

Com relação ao Cobre, houve diferença significativa dentro do Solo Ag para os tratamentos T2, T3 e T4. , e os mesmo comentários para o Fe são válidos aqui, exceto a hipótese de redução.

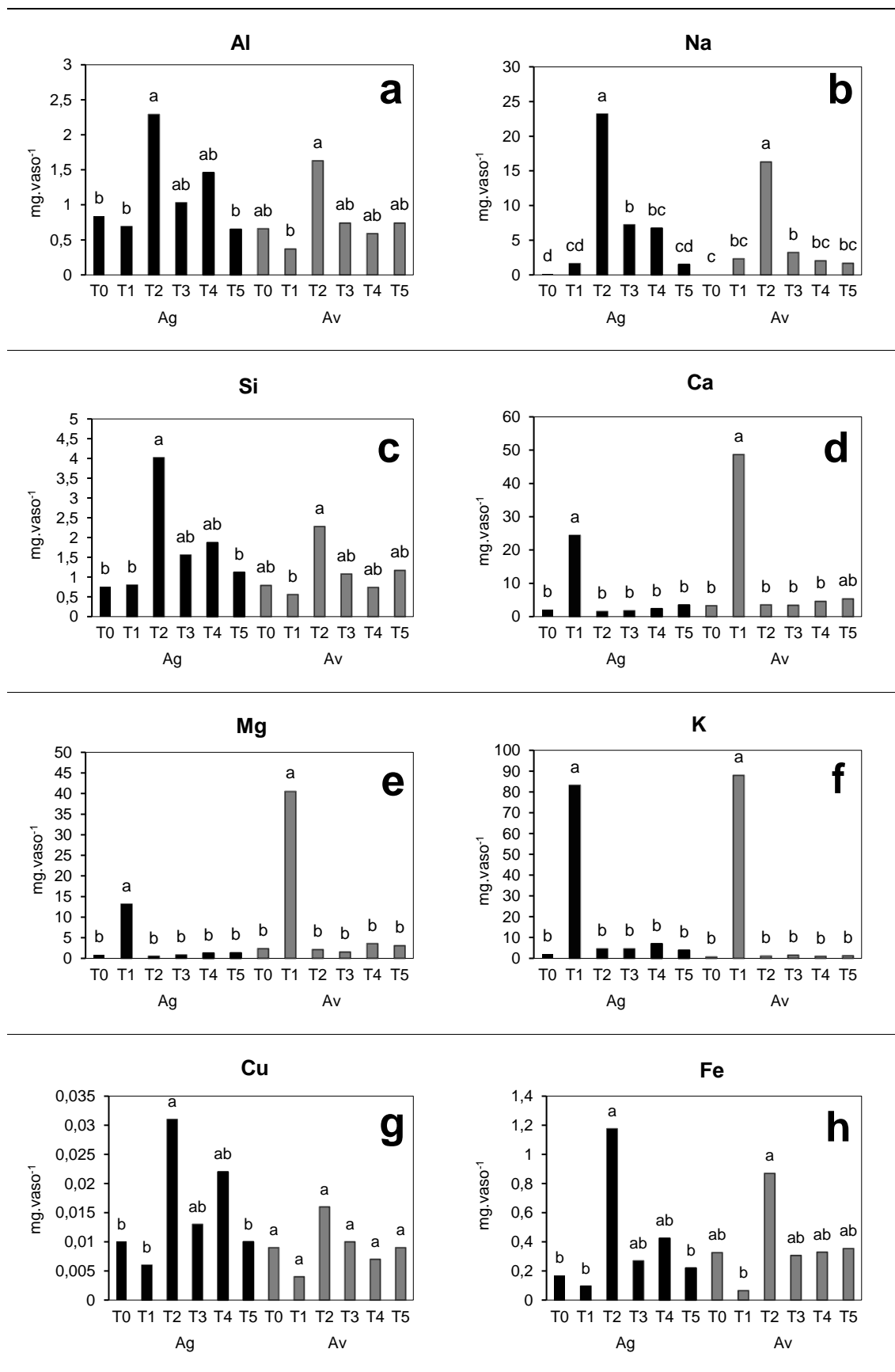


Figura 8. Teores médios de elementos lixiviados, comparados entre os tratamentos com teste Tukey (letras diferentes representam diferença ao nível de 5% de significância).

A matriz de correlação entre as variáveis respostas, que aponta a alta ou baixa relação entre os elementos químicos que compõem os tratamentos (Figura 9).

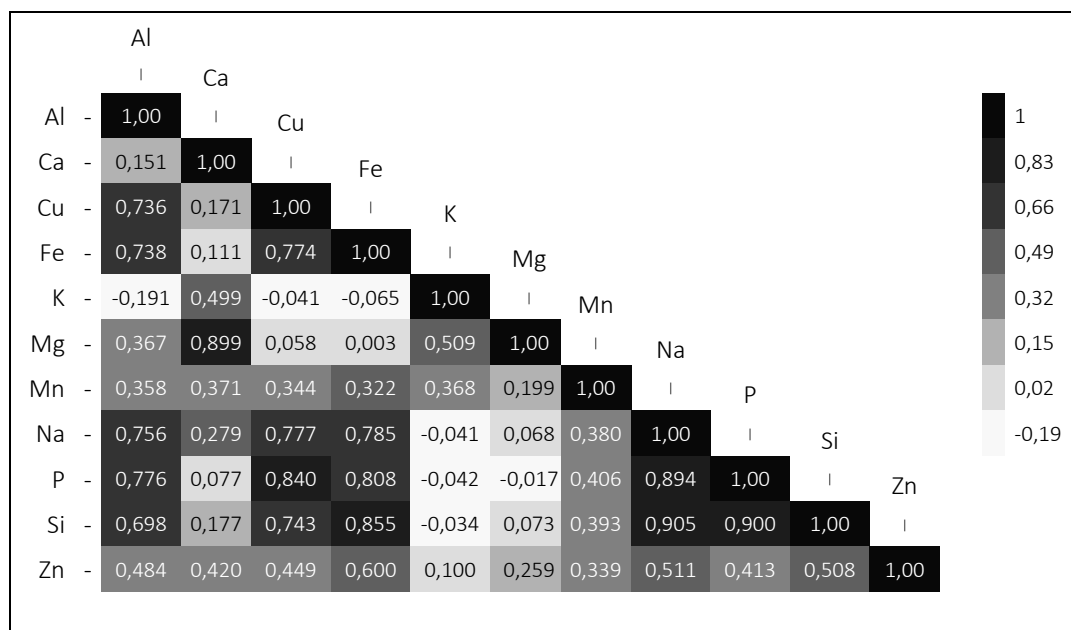


Figura 9. Matriz de correlações

A grande correlação do Na com Fe, Al e Cu está associada à presença desses elementos nos minerais de Na que constituem, principalmente, o Fonolito. As correlações observadas entre o Si, Al, Na, Fe e Cu estão relacionadas aos mesmos minerais de Na e também aos K-feldspatos. Outros minerais que também sustentam a alta relação do Si com Fe, Cu e Mg são os minerais ferromagnesianos constituintes, principalmente, dos basaltos.

A alta correlação entre Al, Fe e P pode estar relacionada à formação de complexos e pares iônicos na solução lixiviante. Para uma solução eletricamente neutra, o PO_4^{4-} apresentam alta afinidade com os semimetais devido a seu médio a alto potencial iônico.

A análise canônica com os elementos Al, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P e Zn como variáveis, resultou na associação de 94,3% da variabilidade dos dados nas duas componentes canônicas 1 e 2. O comportamento das variáveis é mostrado em um gráfico bidimensional que destaca a influência de K, Ca e Mg com alta relação para o tratamento T1 do Solo Av. Para Solo Ag, há alta relação entre os micronutrientes, mais o Al no tratamento T2 (Figura 10).

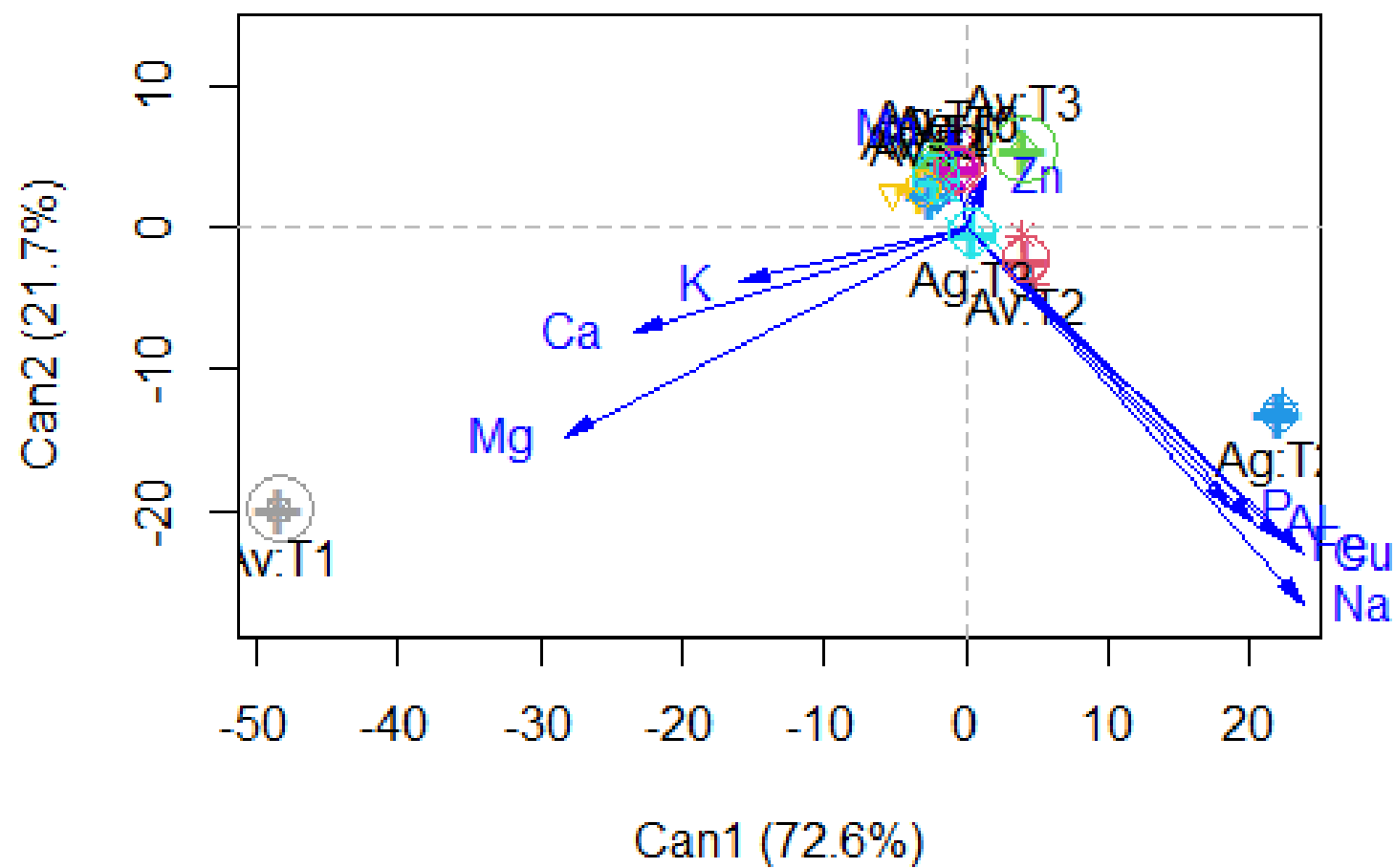


Figura 10. Correlação canônica 1 e 2

Efeitos da interação entre Solo dentro de cada Tratamento na Canônica 1.

O resultado da canônica 1 sozinha explica 72.6% da variabilidade dos dados. Considerando o nível de significância de 0.1%, há um efeito significativo da interação entre Solo dentro apenas dos tratamentos T1 e T2 (Tabela 10).

Tabela 10. Variabilidade relação Solo dentro de cada Tratamento (Canônica 1, lixiviado).

Relação	<i>P-value</i>
Tratamento:Solo	$1,99.10^{-15}$ ***
Solo:Controle (T0)	0,0155*
Solo:KCl (T1)	$< 2.10^{-16}$ ***
Solo:Fon200 (T2)	$5,04.10^{-12}$ ***
Solo:Fon4 (T3)	0,0107*
Solo:Diab (T5)	0,0979

Legendas: níveis de significância 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1

As diferenças observadas na relação anterior são mostradas na figura 11, que pode ser melhor explicada pelas forças dos vetores das variáveis canônicas. A canônica 1 é representada pela maior lixiviação do Mg e Ca (sinal negativo) e maior lixiviação do Al e Fe (sinal positivo)

Dessa forma o Av-T1 se diferencia do Ag-T1 pela maior lixiviação de Mg e Ca e menor lixiviação de Al e Fe. Enquanto que o Ag-T2 se diferencia do Av-T2 pela maior lixiviação de Mg e Ca e menor de Al e Fe.

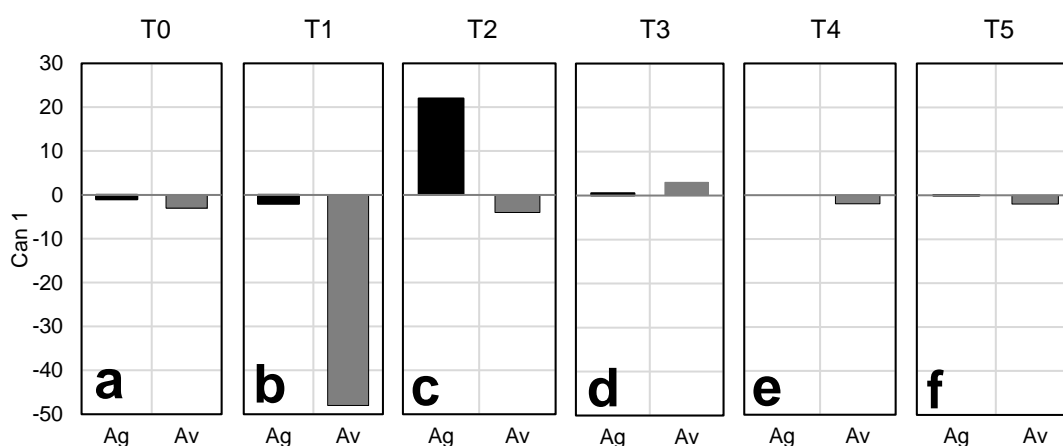


Figura 11. Avaliação do Solo dentro de cada Tratamento (Canônica 1, lixiviado)

Efeitos da interação entre Tratamento dentro de cada Solo na Canônica 1.

As análises das interações mostraram que há um efeito significativo (0.1%) desta relação nos Solos Ag ($P\text{-value: } 3,95.10^{-14}$) e Solo Av ($P\text{-value: } 1,05.10^{-15}$). O teste de Tukey apresentou maior diferença estatística no tratamento T2 no Solo Ag (Figura 12a) e T1 (Figura 12b) para o solo Av. Mesmo nesta relação, os elementos que mais contribuem, no computo com efeitos no lixiviado continuam sendo os mesmos, Ca, Mg, K (Ag) e Fe, Cu, Na, P mais Al (Av).

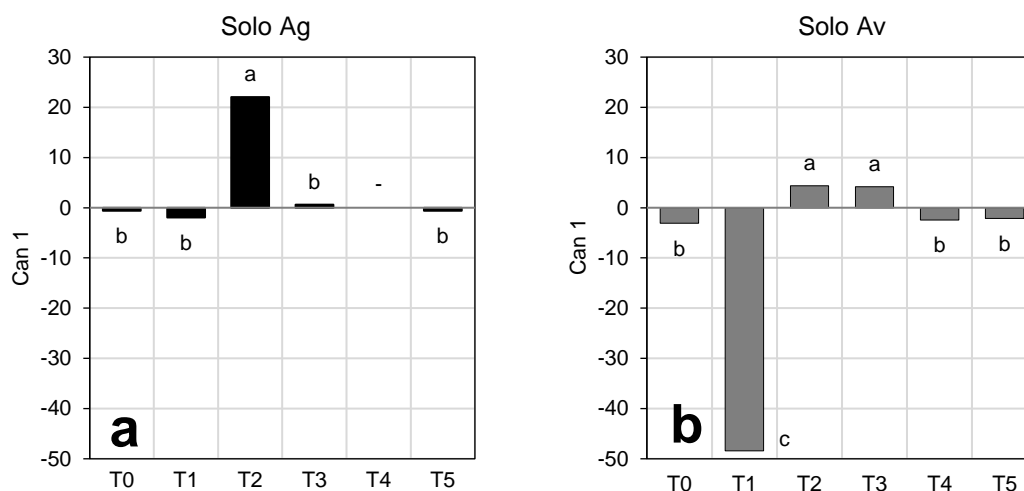


Figura 12. Avaliação do Tratamento dentro de cada Solo. (Canônica 1, lixiviado).

Efeitos da interação entre Solo dentro de cada Tratamento na Canônica 2.

A segunda variável canônica (Can2) explica 21,7% da variabilidade dos dados. As análises das interações mostraram que houve um efeito significativo dos solos nos tratamentos T1, T2 e T3 (Tabela 11).

Tabela 11. Variabilidade dos dados para a relação Solo dentro de cada Tratamento. (Canônica 2, lixiviado).

Relação	<i>P-value</i>
Tratamento:Solo	1,21.10 ⁻¹¹ ***
Solo:Controle (T0)	0,2090
Solo:KCl (T1)	1,29.10 ⁻¹² ***
Solo:Fon200 (T2)	5,21.10 ⁻⁰⁹ ***
Solo:Fon4 (T3)	0,0002***
Solo:Diab (T5)	0,472116

Legendas: níveis de significância 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '*' 0.1 '.' 1

Os solos que mais tiveram efeitos são Av no T1 e Ag em T2 e T3 (Figura 13b, 13c e 13d respectivamente). Sob a óptica dos elementos, aqueles que mais contribuíram no lixiviado (Figura 10), temos que para T1 e T2 (valores negativos da canônica), Ca, Mg e K surtiram maior efeito, enquanto que em T3 (valores positivos), Fe, Cu, Na, P (Figura 13).

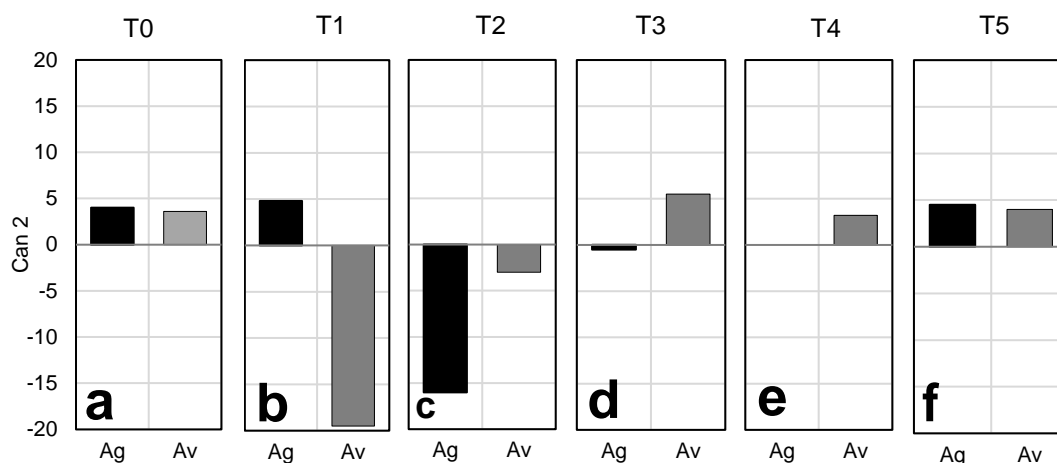


Figura 13. Avaliação do Solo dentro de cada Tratamento (Canônica 2, lixiviado).

Efeitos da interação entre Tratamento dentro de cada Solo na Canônica 2.

As interações mostraram que há um efeito significativo de interação no solo Ag ($P\text{-value: } 3,30.10^{-12}$) e no solo Av ($P\text{-value: } 5,15.10^{-11}$), ambos ao nível de 0.1% de significância. O teste de Tukey apresentou maior diferença estatística no tratamento T2 para o Solo Ag e T1 para o solo Av (Figura 14).

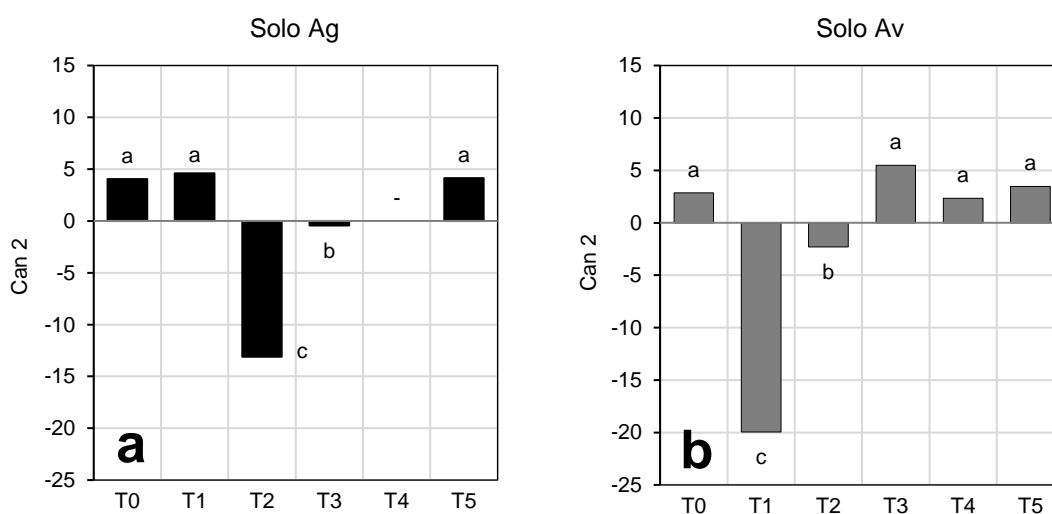


Figura 14. Avaliação do Tratamento dentro de cada Solo. (Canônica 2, lixiviado)

Apesar das análises de rotina para caracterização química (Tabela 3) e física (Tabela 4) destes solos resultarem valores parecidos, exceto para Ca trocável, houve efeito de solo nos tratamentos, no que se refere à quantidade de elementos lixiviados. Parte deste efeito deve ser associado ao maior volume de lixiviado no solo Ag, em parte compensado pela maior concentração de elementos no lixiviado do solo Av (Tabela 8). A grande atividade de K no tratamento T1 (KCL) provocou o deslocamento de Ca e Mg para a solução, aumentando suas perdas. No entanto, para o Al, o aumento no lixiviado ocorreu majoritariamente não pelo deslocamento da troca (já que os teores de Al são menores que 2 mmolc.dm^{-3} nos dois solos), mas pela liberação pelas rochas. Por isto o fonolito apresentou os maiores valores, já que possui minerais de grande solubilidade cuja composição é rica em Si, Al e Na, ausente nas rochas básicas (basalto e diabásio).

A diferença entre T2 (Fonolito 200mesh) e T3 (Fonolito 4 mesh) é o tamanho de partícula, maior 64,5 vezes neste último. Neste sentido, o contraste na Área Superficial Específica entre T2 e T3 resultou na liberação de elementos pelo fonolito em partículas grandes (T3) sem diferença significativa com as ígneas básicas (T4 e T5), para os elementos Al, Na, Si, Ca, Mg, K, Cu e Fe, apresentados no Figura 8. As ígneas básicas (T4 e T5), por sua vez, também não apresentaram diferença significativa. Vale ressaltar mais uma vez, que a variância introduzida pelo tratamento T1 (KCl) e em menor grau pelo T2 (fonolito 200 mesh), aumenta demasiadamente o limite de significância do experimento, forçando a não significância dos tratamentos com rochas de menor solubilidade. Isto é, diferenças entre as ígneas básicas poderiam ter sido identificadas se o experimento contasse apenas com tratamentos com rochas.

A análise canônica confirmou que as maiores fontes de variância no total de elementos lixiviados foram os valores observados no lixiviado do tratamento T1 (KCl), quais sejam, K, Ca e Mg. Os valores de P, Fe, Cu, Al e Na foram, secundariamente, fontes de variância na composição dos lixiviados neste experimento.

5.2. Trocáveis

Tabela 12. Concentrações médias da química do Solo Ag.

Tratamento	pH	M.O	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
	-	g.dm ⁻³								%	%
T0	4,3	12,5	1,6	4	3,3	1,0	11,5	8,73	20,8	44,0	10,5
T1	4,4	10,5	8,7	4,3	1,4	1,0	11,3	13,5	25,8	55,0	7,8
T2	5,2	11,0	2,2	4,8	2,0	0,1	11,0	8,7	20,1	45,0	0,0
T3	4,5	9,5	1,6	3,5	1,0	1,5	12,0	6,1	18,1	34,0	15,5
T4	4,4	11,0	1,0	4,0	2,0	1,0	12,0	7,0	19,0	37,0	13,0
T5	4,7	11,5	1,0	5,3	2,5	0,3	11,5	8,8	20,3	43,3	2,5
T6	4,7	11,5	1,9	4,0	1,7	0,5	11,5	7,8	19,4	40,5	5,3

Tabela 13. Concentrações médias da química do Solo Av

Tratamento	pH	M.O	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
	-	g.dm ⁻³								%	%
T0	4,9	13,8	0,9	7,3	4,8	0,3	11,8	12,6	24,3	51,5	1,5
T1	5,1	12,0	6,1	6,0	3,5	0,5	11,0	15,7	26,7	59,0	3,0
T2	4,8	12,5	0,8	7,0	4,0	0,0	11,5	11,5	23,0	50,0	0,0
T3	5,2	13,5	1,4	6,5	4,3	0,0	12,0	12,2	24,2	50,0	0,0
T4	4,9	13,4	0,8	6,4	4,2	0,0	11,6	11,2	22,8	49,0	1,8
T5	4,8	12,0	1,8	7,0	3,0	1,0	11,0	11,8	22,8	51,0	8,0
T6	4,8	13,5	0,9	7,0	3,0	1,0	13,5	10,9	24,4	45,0	8,5

Efeitos da interação entre Solo dentro de cada Tratamento para os elementos no trocável.

Tais resultados revelam que apenas o teor de Potássio (K) foi significativo (0.1%) em ambos os solos. Para as demais análises os efeitos são correspondidos para pH, Ferro (Fe), Magnésio (Mg) (significantes a 5%), Zinco (Zn) e Saturação por Bases (SB) (significantes a 0.1%) apenas no Solo Ag (Tabela 14).

Tabela 14. Testes estatísticos (ANOVA) avaliando Solo dentro do cada Tratamento no trocável.

Elementos	Solo Ag	Solo Av
pH	0,0132 *	0,8671
K	3,59.10 ⁻⁰⁶ ***	0,000136 ***
Ca	0,7740	0,9370
Fe	0,0318 *	0,2517
Mg	0,0303 *	0,2478
Na	0,0811	0,1439
P	0,187	0,326
Si	0,359	0,239
Zn	0,00089 ***	0,67463
H+Al	0,5550	0,0928
SB	0,000119 ***	0,686437

Legendas: níveis de significância: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1

Considerando os componentes de análise que tiveram efeitos significativos (Tabela 14), o teste de Tukey a seguir, traz para cada elemento, quais tratamentos apresentam diferenças significativas (Tabela 15).

Tabela 15. Comparação de medias (Tukey) para as interações significativas solo dentro de tratamentos (ver tabela 14).

Trat.	pH	Fe	Zn	Mg	SB	K Solo Ag	K Solo Av
	-	mg.dm. ³		mmolc.dm. ³			
T0	4,3 ^A	23,9 ^{AB}	0,6 ^{AB}	3,3 ^A	8,73 ^{BC}	1,6 ^B	0,9 ^B
T1	4,4 ^{AB}	28,5 ^{AB}	0,7 ^B	1,4 ^{AB}	13,5 ^C	8,7 ^A	6,1 ^A
T2	5,2 ^B	30,1 ^A	0,6 ^B	2,0 ^{AB}	8,7 ^B	2,2 ^B	0,8 ^B
T3	4,5 ^{AB}	21,9 ^{AB}	0,5 ^{AB}	1,0 ^B	6,1 ^A	1,6 ^B	1,4 ^B
T4	4,4 ^{AB}	25,0 ^{AB}	0,6 ^{AB}	2,0 ^{AB}	7,0 ^{AB}	1,0 ^B	0,8 ^B
T5	4,7 ^{AB}	29,9 ^{AB}	0,6 ^B	2,5 ^{AB}	8,8 ^{BC}	1,0 ^B	1,8 ^B
T6	4,7 ^{AB}	20,8 ^B	0,4 ^A	1,7 ^{AB}	7,8 ^{AB}	1,9 ^B	0,9 ^B

Com base na análise de variância multivariada com os elementos respostas pH, P, K, Ca, Mg, Al, H.Al, CTC, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Si, tem-se a composição da análise de correlação canônica 1 e 2 no trocável. Os resultados desta análise representam juntas 87%

da variabilidade dos dados. Pode-se observar na figura 15, o comportamento da relação entre elementos e os tratamentos que compõem o experimento.

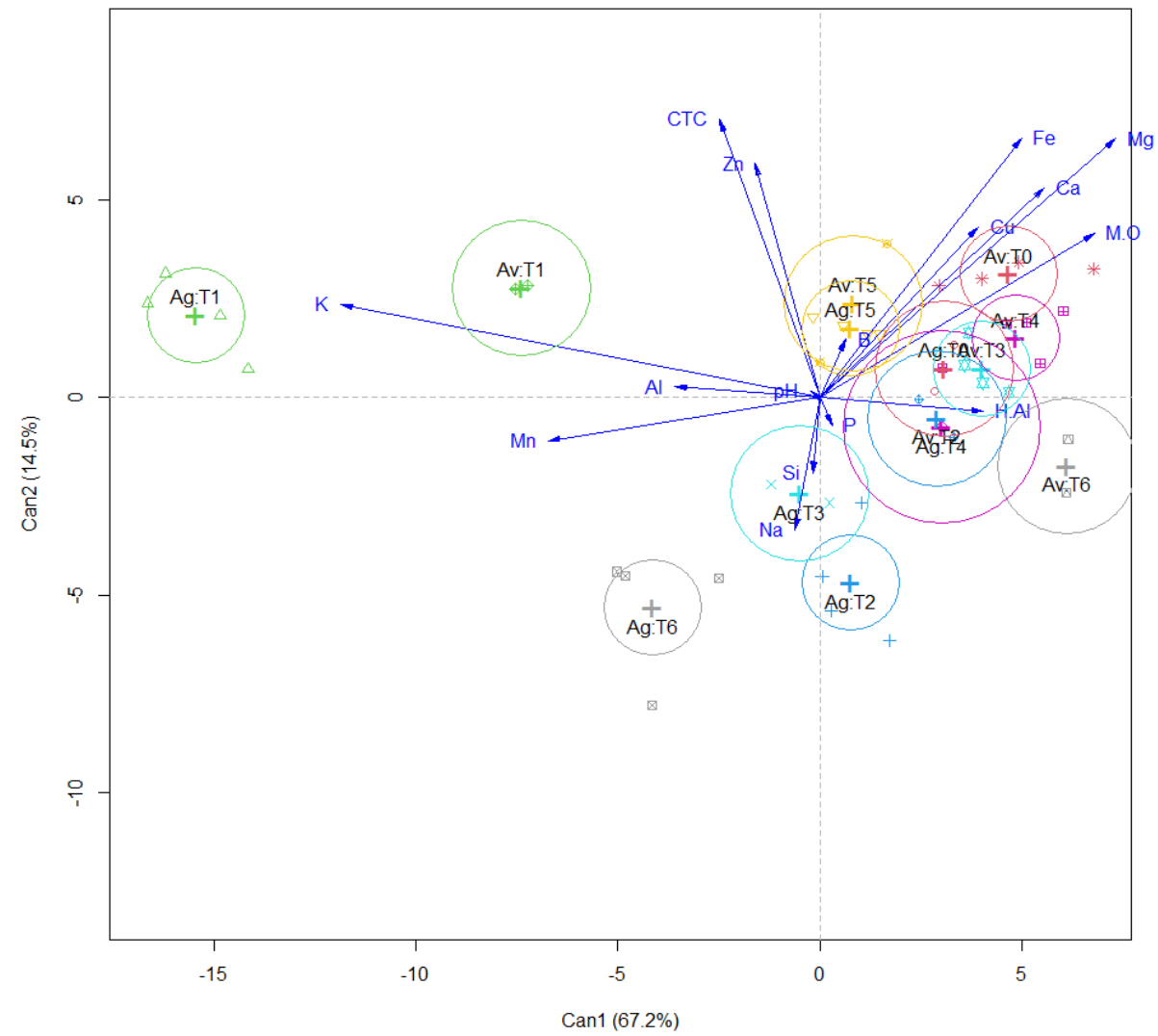


Figura 15. Variável canônica 1 e 2, trocável

Efeitos da interação entre Solo dentro de cada Tratamento na Canônica 1.

Os resultados estatísticos mostram que a canônica (Can1) representa 67,2% da variabilidade dos dados, para o nível de 5 % de significância. Apenas nos tratamentos T1, T2 e T3 tiveram diferenças significativas, com maior efeito de interação em T1 e T3 (Tabela 16).

Tabela 16. Variabilidade dos dados no trocável para a relação Solo dentro de cada Tratamento (Canônica 1, trocável).

Relação	P-value
Solo:Controle (T0)	0,08
Solo:KCl (T1)	$4,52.10^{-10}$ ***
Solo:Fon200 (T2)	0,02 *
Solo:Fon4 (T3)	$1,65.10^{-10}$ ***
Solo:Bas (T4)	0,10
Solo:Diab (T5)	0,10
Solo:Fon200SI (T6)	0,95

Legendas: níveis de significância 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1

Efeitos da interação entre Tratamento dentro de cada Solo na Canônica 1.

As interações mostraram que há um efeito significativo desta relação nos solos Ag ($P\text{-value: } 2,10.10^{-1}$) e Av ($P\text{-value: } 3,04.10^{-1}$) ao nível de 5% de significância. O teste de Tukey apresentou maior diferença estatística no tratamento T1 com destaque para o Solo Ag (Figura 16b).

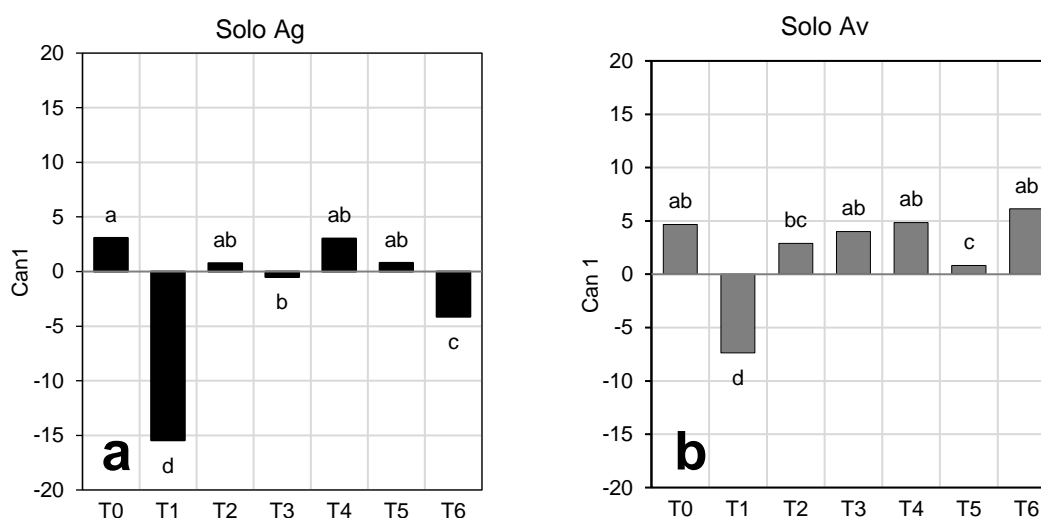


Figura 16. Avaliação do Tratamento dentro de cada Solo. (Canônica 1, trocável)

Efeitos da interação entre Solo dentro de cada Tratamento na Canônica 2.

Os resultados da canônica 2 representam 14,5% da variabilidade dos dados. Não há efeitos significativos do Solo apenas os tratamentos T1 e T6. Os demais todos têm efeitos ao nível de 5% (Tabela 17).

Tabela 17. Variabilidade dos dados no trocável para a relação Solo dentro de cada Tratamento (Canônica 2, trocável)

Relação	P-value
Solo:Controle (T0)	0,01013 *
Solo:KCl (T1)	0,42182
Solo:Fon200 (T2)	4,66.10 ⁻⁰⁵ ***
Solo:Fon4 (T3)	0,00102 ***
Solo:Bas (T4)	0,04881 *
Solo:Diab (T5)	0,04881 *
Solo:Fon200SI (T6)	0,47411

Legendas: níveis de significância 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1

Efeitos da interação entre Tratamento dentro de cada Solo na Canônica 2.

Observando os resultados do teste de Tukey para Solo Ag (P -value: $1,24.10^{-11}$) e Av (P -value: $1,24.10^{-11}$), os tratamentos T2, T3 e T5 foram mais fortemente influenciados por valores negativos na análise canônica para o Solo Ag, enquanto que para o Solo Av no geral ficaram com valores positivos (Figura 17).

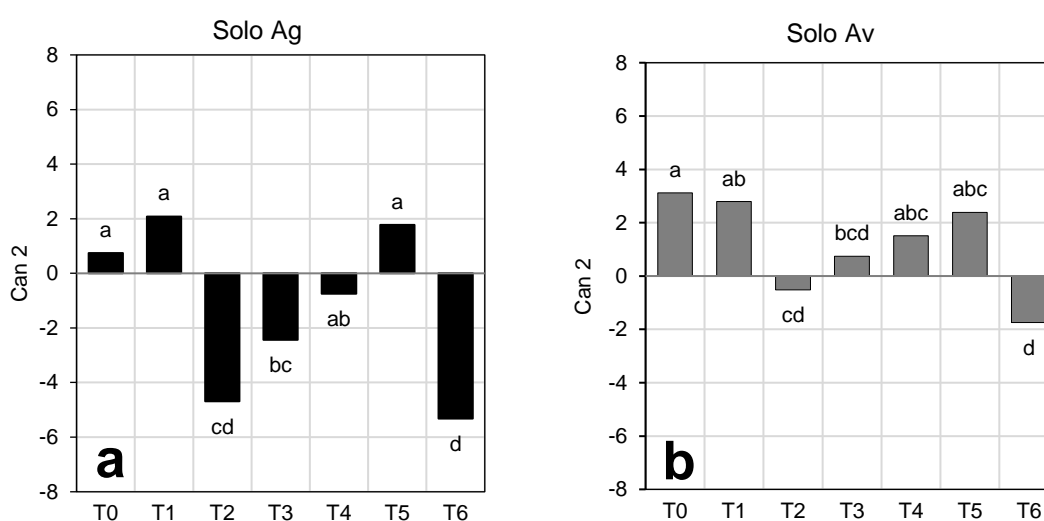


Figura 17. Avaliação do Tratamento dentro de cada Solo. (Canônica 2, trocável)

6. CONCLUSÕES

Houve efeito da interação entre Solo dentro de cada Tratamento nos teores de lixiviados para todos os elementos-respostas analisados nos dois solos que compõem o experimento, exceto P e Cu para o solo Avai. Na comparação direta dentro de cada solo, o tratamento com cloreto de potássio (KCl) teve efeitos mais expressivos na liberação do K, o que já era esperado segundo a literatura. Tal fato culminou na liberação também na lixiviação das bases Ca^{2+} , Mg^{2+} , em ambos os solos.

Mesmo fonolito contendo em torno de 8% de K_2O , que em tese é o maior teor de K entre os agrominerais silicáticos analisados, os efeitos no lixiviado não foram expressivos comparando ao KCl.

Estes efeitos certificam a contribuição significativamente maior na oferta de potássio para a solução do solo, em curto período de tempo, quando a fonte é o fertilizante convencional. Mas não se descarta que a liberação de K por fontes de rochas possam contribuir com um efeito residual a longo prazo.

A maior liberação verificada de alumínio, sódio e silício por parte dos tratamentos com pó de rocha no lixiviado nos dois solos se deve sobretudo à composição mineralógica dos mesmos, onde sob efeitos da ação de intemperismo os minerais com altos teores de Na podem vir a solubilizar mais rapidamente. Como o efeito desses elementos não foram expressivos nos trocáveis, a princípio não causa preocupação para o desequilíbrio nutricional das plantas.

Houve efeitos, ainda que pequenos, de interação entre os tratamentos no trocável apenas no solo com maiores teores de argila, porém estes efeitos não contribuíram substancialmente para a fertilidade do solo no período curto desta análise. O tratamento que obteve destaque foi, assim como nos teores de lixiviado, a fonte de cloreto de potássio (KCl), contribuindo em paralelo com o aumento da soma de bases (SB) do solo.

Conclui-se, portanto, que os efeitos da aplicação de agrominerais silicáticos em experimentos de vaso contribuem sensivelmente na oferta de elementos, tendo efeitos mais significativos no lixiviado, mas com baixa contribuição na química dos trocáveis, provavelmente devido à pequena duração do experimento.

Considerações Finais

São dois os pontos que devem ter atenção sobre este experimento. O primeiro é a contribuição do fertilizante altamente solúvel na disponibilidade de potássio nos solos e, principalmente, nas perdas por lixiviação. Nas condições deste experimento, foram aplicados 1.3 g de K por vaso (independente do tratamento). No tratamento KCl, entre 17.23% (solo Ag) e 20.99% (Solo Av) foram perdidos por lixiviação, enquanto nos tratamentos com agrominerais as perdas ficaram entre 0.36% (T2 e T4, solo Av) e 1.84% (T4, solo Ag) do total aplicado, isto é, na fonte KCl as perdas foram entre 10 a 60 vezes maiores que nas fontes silicatadas. Esta grande diferença interfere na diferença mínima significativa para atingir significância na comparação entre tratamentos. Tais efeitos podem vir a obter respostas agronômicas e florestais mais interessantes para o uso dos agrominerais silicáticos em solos de baixa fertilidade natural, como estes coletados no Planalto Ocidental Paulista. Logicamente a resposta das culturas são mais rápidas e maiores com o uso das fontes solúveis, mas no contexto dos solos arenosos sob pastagens no POP, aspectos como custos, métodos de aplicação, quantidades e sobretudo interações diretas das rochas com a biodiversidade do solo podem vir a tornar o uso dos agrominerais silicáticos favorável em relação ao uso do cloreto de potássio, e ainda a se considerar os prováveis efeitos residuais da aplicação destes materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. (2016). **Instrução Normativa MAPA Nº 05**. Estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. Publicado no DOU em 14 de maio de 2016.

BOLLAND, M.D.A.; BAKER, M.J. **Powdered granite is not an effective fertilizer for clover and wheat in sandy soils from Western Australia. Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.56, p.59–68, 2000

CARVALHO, A.M.X. Rochagem: **Um novo desafio para o manejo sustentável da fertilidade do solo**. In: SILVA, J.C.; SILVA, A.A.S.; ASSIS, R.T. (orgs.) *Sustentabilidade produtiva e inovação no campo*. Uberlândia: Composer, 2013. p. 117 – 132.

CHIARINI, J.V.; VERDADE, F.C.; BORGONOV, M.; AMARAL, Z.A. Instituto Agrônomo de Campinas. **PASTAGENS EM ALGUNS MUNICÍPIOS PAULISTAS E ESTUDO DA ÁREA BASAL E SOMBREAMENTO**. Bragantia: Boletim Científico do Instituto Agrônomo de São Paulo, Campinas, v. 26, n. 2, p.1-12, fev. 1967.

COREONOS, C.; HINSINGER, P.; GILKES, R. J. **Granite powder as a source of potassium for plants: a glasshouse bioassay comparing two pasture species. Fertilizer Research** 45, 143-152. 1996.

CRUNDWELL, F. K. **The mechanism of dissolution of the feldspers: Part I. Dissolution at conditions far from equilibrium Hidrometallurgy**, Amsterdam, v. 151, n. 1, p. 151-162, jan, 2015.

DIAS-FILHO, M.B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil / Moacyr Bernardino Dias-Filho**. – Belém, PA : Embrapa Amazônia Oriental, 2014.

DOU - **Diário Oficial da União. Lei número 12.890**, 10 Dezembro 2013. Publicado em 11/12/2013.

DUARTE, I. N.; PEREIRA, H.S.; KONDORFER, G. H.; **Lixiviação de potássio proveniente do termopotássio**. Pesquisa Agropecuária Tropical., Goiania, v.43, n. 2., p. 195-200, abr/jun. 2013.

ESCOSTEGUY, P.A.V.; KLAMT, E. **Basalto moído como fonte de nutrientes**. Revista Brasileira de Ciências do Solo, Viçosa, v.22,p. 11-20, 1998.

FAO. The state of food and agriculture. Rome: FAO, 2009. Disponível em: <http://bit.ly/dcsAFD>. Acesso em: 25 jul. 2013. FERRAZ, J. B. S.; FELÍCIO, P. E. D. Production systems - An example from Brazil. Meat Science, v. 84, n. 2, p. 238-243, 2010.

Hudson, B. D. (1995). Reassessment of Polynov's Ion Mobility Series. Soil Science Society of America Journal, 59(4), 1101. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900040022x>

KUDLA, A.P.; MOTTA, A.C.V.; KUDLA, M.E. **Efeito do pó de basalto aplicado em um Cambissolo Álico sobre o solo e crescimento do trigo**. Revista do Setor de Ciências Agrárias, Curitiba, v. 15, n. 2, p.187-195, 1996.

PACIULLO, D.S.C; GOMIDE, C.A.M; LEITE, J.L.B; RESENDE, H; **Tecnologia e custo de produção de *Brachiaria decumbens* para uso sob pastejo**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2016, 6p. (Embrapa Gado de Leite. Circulação Técnica, 111).

RESENDE, A. V. et al. **O suprimento de potássio e pesquisa de uso de rochas “in natura” na agricultura brasileira**. Espaço e Geografia, Brasília, DF, v. 9, n. 1, p. 19-42, 2006.

SILVA, R. C. **Intemperismo de minerais de um remineralizador – versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011**. – Piracicaba, 2016. 183 p.: il. Tese de Doutorado. - - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

SOUZA, F. N. S., OLIVEIRA, C.G.; MARTINS, E.S., ALVES, J.M. **Efeitos condicionador e nutricional de um remineralizador de solos obtido de resíduos de mineração**. Revista Agri-Environmental Sciences, Palmas – TO, v.3, n.1, 2017.

ROSSI, M. 2017. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. V.1. 118p. (inclui Mapas).

WELTER, M.K.; MELO, V.F.; BRUCKNER, C.H.; GÓES, H.T.P.; CHAGAS, E.A.; UCHÔA, S.C.P. **Efeito Da Aplicação De Pó De Basalto No Desenvolvimento Inicial De Mudanças De Camu-Camu** (*Myrciaria dubia*). Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, v. 33, n. 3, p.922-931, set. 2.