



EDUANE JOSÉ DE PÁDUA

**ROCHAGEM COMO ADUBAÇÃO
COMPLEMENTAR PARA CULTURAS
OLEAGINOSAS**

LAVRAS - MG

2012

EDUANE JOSÉ DE PÁDUA

**ROCHAGEM COMO ADUBAÇÃO COMPLEMENTAR PARA
CULTURAS OLEAGINOSAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto

Coorientadores

Dr. Álvaro Vilela de Resende

Dr. Silvino Guimarães Moreira

LAVRAS - MG

2012

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Pádua, Eduane José de.

Rochagem como adubação complementar para culturas
oleaginosas / Eduane José de Pádua. – Lavras : UFLA, 2012.
91 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.
Orientador: Antonio Eduardo Furtini Neto.
Bibliografia.

1. Agrominerais. 2. Pó de rocha. 3. Fertilidade do solo. 4.
Resíduos de mineração. 5. Biodiesel. I. Universidade Federal de
Lavras. II. Título.

CDD – 631.8

EDUANE JOSÉ DE PÁDUA

**ROCHAGEM COMO ADUBAÇÃO COMPLEMENTAR PARA
CULTURAS OLEAGINOSAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 29 de fevereiro de 2012.

Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto UFLA

Dr. Álvaro Vilela de Resende EMBRAPA MILHO E SORGO

Dr. Silvino Guimarães Moreira UFSJ

Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto

Orientador

LAVRAS – MG

2012

À família, berço das boas virtudes e sentimentos verdadeiros, refúgio sagrado e fortaleza de quem a cultiva. Além de pai, mãe e irmãos, a todos aqueles ligados pelo amor, que torceram e compartilharam das angústias, alegrias, suor, sorrisos, derrotas e CONQUISTAS

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde, pelos meus dons e talentos confiados.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciência do Solo, pelos ensinamentos transmitidos e convivência harmoniosa dos professores, técnicos e servidores.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto, ao pesquisador Dr. Álvaro Vilela de Resende e ao professor Dr. Silvino Guimarães Moreira, pela orientação, pela oportunidade de trabalho conjunto e por terem aceitado participar da banca examinadora. Ao professor Dr. Joel Augusto Muniz, pelas considerações e correções estatísticas.

Ao Dr. Éder de Souza Martins, da Embrapa Cerrados, coordenador do projeto MCT/FINEP “Projetos pilotos do uso de novas fontes e rotas tecnológicas de agrominerais na produção de biocombustíveis líquidos-ROCKAPL” e a Sra. Luciana Lucas, pelo apoio com a documentação referente ao projeto.

Às empresas CIF Mineração, Mineração Curimbaba, Mineração Santa Terezinha – MISTEL e ITAFÓS Fertilizantes, pela concessão dos agrominerais testados.

À equipe da fazenda Santa Helena e do Grupo G7, na pessoa do Evandro Ferreira e do Fábio Sidnei Correia, pela parceria e apoio operacional em campo.

À minha namorada, Vivi, pelo otimismo, confiança e dedicação e aos colegas pós-graduandos Benatti, Moretti, Daniele, Paulo Avelar, Thiago Reis, Rogner, Julian, Breno, Clério e Anna Hoffmann, pela preciosa ajuda, ora com os experimentos, ora com os dados, resultados e sugestões.

Aos estudantes Marcos (Baiano), Sabrina Torqueti, Marina, Maysa, Sabrina Silva, Nathan, Cassiano, Ronan, Paulo (Buda), Henrique (Bambuí), Bruno (Ibiá) e Bozo, que também trabalharam neste projeto e aos técnicos do Departamento de Ciência do Solo, Roberto Lelis, Cristina, Humberto, Gilberto e José Roberto (Pezão), pela essencial participação através de suas funções.

Aos professores da UFLA, Dr. Pedro Castro Neto e Dr. Antônio Carlos Fraga, pela ajuda com o experimento e participação nos dias de campo realizados.

RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de testar a viabilidade agrônômica da rochagem aplicada em substituição parcial da adubação convencional para os cultivos do girassol e da soja. As fontes MAP e KCl foram parcialmente substituídas pelas combinações nas doses de 1.000 kg ha⁻¹ e 5.000 kg ha⁻¹, dos agrominerais fosforito/zinnwaldita, fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito. Em acréscimo, foram instalados mais três tratamentos: controle (sem adubação de correção), fosforito/KCl, e referência (com MAP e KCl), em condições de campo, num Latossolo Vermelho Distrófico argiloso, seguindo um delineamento em blocos ao acaso, com três blocos e duas repetições dentro do bloco. No primeiro cultivo com girassol, na safra de 2010, houve uma superioridade do tratamento convencional, porém, acompanhada de perto pelos tratamentos fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito. Apesar de menor concentração de nutrientes e da menor solubilidade das rochas, foi possível obter boa nutrição e produtividade semelhante usando a rochagem em complemento à adubação convencional. Avaliando o efeito residual dos tratamentos sobre a soja na safra 2010/2011, mesmo com produtividades em geral baixas, foram observados efeitos positivos das rochas fosforito, anfibolito, micaxisto e fonolito, superiores aos observados nas áreas adubadas apenas com fontes convencionais de nutrientes. Os tratamentos fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito mostraram-se eficientes para a produção de girassol e de soja, seguindo uma estratégia de baixo uso de insumos e apresentaram efeito residual de P, K e de outros nutrientes.

Palavras-chave: Agrominerais. Pó de rocha. Fertilidade do solo. Resíduos de mineração. Biodiesel.

ABSTRACT

The aim of this work was to test the agronomic viability of rock powder applied in partial substitution of conventional fertilization for sunflower and soybean crops. MAP and KCl sources were partially replaced by combinations at 1000 kg ha⁻¹ and 5000 kg ha⁻¹ doses of phosphorite/zinnwaldita, phosphorite/amphibolite, phosphorite/mica schist and phosphorite/phonolite. In addition, three treatments were installed: control (without corrective fertilization), phosphorite/KCl and reference (with MAP and KCl) under field conditions in a clayey dystrophic Red Latosol (Oxisol), in a randomized block design, with three blocks and two replicates within the bloc. For the first cultivation with sunflower, in the “small” harvesting period in 2010, there was a superiority of the conventional treatment, however, closely followed by phosphorite/amphibolite, phosphorite/mica schist and phosphorite/phonolite treatments. Despite the lower concentrations of nutrients and lower solubility of the rocks, it was possible to achieve good nutrition and similar productivity using rock powder in addition to conventional fertilization. Assessing the residual effects of treatments on soybeans harvest in 2010/2011, even with generally low yields, positive effects were found for use of phosphorite, amphibolite, mica schist and phonolite rocks, higher than in areas fertilized with conventional sources of nutrients. The phosphorite/amphibolite, phosphorite/mica schist and phosphorite/phonolite treatments were effective for the production of sunflower and soybeans following a low-input strategy and presented residual effect of P, K and other nutrients.

Keywords: Agrominerals. Rock powder. Soil fertility. Mining residues. Biodiesel.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	A agricultura brasileira e a demanda por fertilizantes	15
2.2	Produção de matéria-prima para biocombustíveis e aumento da demanda por fertilizantes.....	15
2.3	Rochagem como opção para fornecimento de nutrientes.....	18
2.4	Fatores que afetam a eficiência da rochagem.....	22
2.5	Processos para aumentar a eficiência no uso de agrominerais	25
2.6	Respostas à rochagem.....	28
2.7	Agrominerais utilizados no presente estudo	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	Cultivo de girassol na safrinha de 2010.....	47
4.1.1	Fertilidade do solo no período da safrinha	47
4.1.2	Nutrição mineral do girassol.....	51
4.1.2.1	Estado nutricional do girassol.....	51
4.1.2.2	Matéria seca da parte aérea e produtividade do girassol na safrinha de 2010	55
4.1.2.3	Acúmulo de nutrientes na parte aérea do girassol.....	58
4.1.2.4	Acúmulo de nutrientes nos aquênios do girassol.....	60
4.2	Cultivo da soja na safra 2010/2011 e efeito residual dos tratamentos	62
4.2.1	Fertilidade do solo na safra da soja 2010/2011	63
4.2.2	Nutrição mineral da soja	67
4.2.2.1	Estado nutricional da soja.....	67
4.2.2.2	Matéria seca da parte aérea e produtividade da soja	70
4.2.2.3	Acúmulo de nutrientes na parte aérea da soja na época da colheita	73
4.2.2.4	Acúmulo de nutrientes nos grãos de soja.....	73
4.3	Avaliação econômica por meio da simulação de custos dos agrominerais.....	76
5	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICES	90

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, país de dimensões continentais, é considerado uma grande potência nos setores da agricultura, silvicultura e pecuária, ocupando posição de destaque em relação aos países desenvolvidos e emergentes. Levantamentos feitos pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA (2012) mostram que 22,34% do PIB brasileiro de 2010 se devem ao agronegócio (agricultura, pecuária, indústria e distribuição).

Os solos brasileiros, base para sustentar esse desenvolvimento, de forma geral, são ácidos, empobrecidos pela ação do intemperismo, carentes, principalmente, em fósforo e potássio. Para conseguir um bom desempenho no campo, é preciso elevado investimento em fertilizantes e corretivos. Torna-se necessária, então, a importação de grande parte dos fertilizantes ou de suas matérias-primas, já que a produção nacional da maior parte destes produtos é insuficiente. Segundo dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos - ANDA (2009), 73% do nitrogênio, 54% do fósforo e 92% do potássio consumidos no Brasil em 2009 foram comprados de outros países. A grandeza do agronegócio brasileiro contrapondo-se à altíssima dependência externa de insumos fez com que Lapiro-Loureiro (2009) associasse o Brasil a um “gigante de pés de barro”, ressaltando a fragilidade nacional da produção de fertilizantes, acentuada pelas sérias limitações dos seus solos de forma geral e alertando para a importância de se buscar alternativas.

Observam-se, entretanto, alguns agravantes, como o aumento da demanda por insumos, gerado pelos países emergentes, mantendo os preços em alta. Além disso, com o desenvolvimento do setor agroenergético brasileiro e os avanços na produção de biocombustíveis, espera-se um aumento na demanda nacional por fertilizantes e insumos. Os biocombustíveis, etanol e biodiesel, têm ganhado espaço no mercado mundial de produção de energia. Esta

diversificação na matriz energética torna-se cada vez mais atrativa, devido a inúmeras vantagens, como a origem em fontes renováveis, como cana-de-açúcar e culturas oleaginosas diversas, energia mais limpa comparada ao petróleo e instabilidade geopolítica de regiões petrolíferas. O biodiesel é 78% menos poluente que o diesel derivado do petróleo, contém menos enxofre e pode ser usado, em misturas ou puro, em qualquer motor diesel (YOKOMIZO, 2003).

Além de benefícios ambientais e econômicos, como a geração de empregos na produção de matérias-primas e nas fábricas para beneficiamento e produção de óleo, o biodiesel tem papel importante na inclusão social dos agricultores familiares. Dentro do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) foi criado o Selo Combustível Social como forma de promover a inserção qualificada de agricultores familiares na cadeia de produção do biodiesel. De acordo com a Instrução Normativa nº 1, de 19 de fevereiro de 2009 (BRASIL, 2009), o selo é concedido pelo Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA) ao produtor de biodiesel que, comprovadamente, adquira um percentual mínimo da matéria-prima de agricultores familiares, percentual que varia de 15% a 40%, para as diferentes regiões do país. Como vantagens, os produtores do combustível detêm o status de promotor de inclusão social, promovendo assim sua imagem no mercado; têm condições diferenciadas ou até isenção nos tributos PIS/PASEP e COFINS e têm acesso a melhores condições de financiamento e à participação assegurada de 80% de seu biodiesel negociado com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, a ANP (BRASIL, 2011).

O destaque do agronegócio e da produção dos biocombustíveis do país esbarra na grande quantidade de insumos importados. Em 2006, o Brasil importou mais de 12 milhões de toneladas de fertilizantes intermediários e matéria-prima, e essa tendência deve se intensificar com os programas voltados para os biocombustíveis produzidos a partir de matérias-primas vegetais, tais

como cana-de-açúcar, soja, mamona, pinhão-manso, girassol, amendoim e dendê.

A busca por fontes de nutrientes eficientes, econômicas e mais acessíveis tem importante papel na economia brasileira e vários projetos que buscam novas fontes nacionais de nutrientes, inclusive voltados à produção de biocombustíveis, começaram a ser apoiados pelo governo federal. Cabe citar o projeto do MCT/FINEP, coordenado pelo pesquisador da Embrapa Cerrados, Dr. Éder de Souza Martins, que busca novas fontes agrominerais e rotas tecnológicas de produção de fertilizantes voltados para os biocombustíveis líquidos em âmbito regional (Projeto ROCKAPL). Este trabalho exemplifica o investimento no desenvolvimento científico e tecnológico em várias regiões do país, envolvendo produtores rurais, mineradoras, instituições de ensino, pesquisa, transferência de tecnologia, assistência técnica e gerencial.

O termo agrominerais é utilizado para descrever as matérias-primas de origem mineral (rochas, resíduos de mineração, garimpo e metalurgia) passíveis de serem utilizados na agropecuária com efeitos benéficos na fertilização, na correção e ou no condicionamento do solo.

O uso de rochas moídas como fontes agrominerais com fins de fertilização do solo é conhecido como rochagem e, embora possa parecer uma novidade, já é praticado há vários anos, tendo como exemplos as práticas agrícolas da calagem e a fosfatagem (MEERT et al., 2009). Esta técnica tem despertado a atenção de pesquisadores em todo o mundo como uma das alternativas às fontes convencionais de nutrientes. A rochagem pode tornar-se uma importante técnica de fertilização, complementar às práticas tradicionalmente utilizadas no Brasil, indicada, a princípio, para pequenos produtores e em escala regional, como ocorre com o calcário atualmente, destacando-se pela diversidade de matérias-primas com potencial para uso como agrominerais e ampla distribuição geográfica.

Ainda há grande escassez de conhecimentos sobre quais materiais são mais promissores e quais métodos são mais indicados para análises, dosagens, granulometria ideal, formas de se aumentar a solubilidade destes materiais, desempenho no cultivo de diferentes espécies. Luz et al. (2010) publicaram, recentemente, algumas das prioridades para o desenvolvimento do tema agrominerais voltados para a produção de biocombustíveis. Os autores recomendam o mapeamento geológico de rochas com potencial de uso como agrominerais, a caracterização geoquímica e mineralógica das rochas, o aproveitamento de rejeitos dos processos de mineração, o estudo dos efeitos da rochagem no cultivo de oleaginosas e cana-de-açúcar, usadas na produção de biocombustíveis, a avaliação dos impactos ambientais envolvidos e o estudo da normatização, padronização de rochas e minerais industriais alternativos para a produção de fertilizantes.

Como vantagens atribuídas à rochagem, podem-se citar o fornecimento de vários nutrientes simultaneamente, devido à composição variada dos agrominerais e a disponibilização de nutrientes de forma mais gradual, tornando-os uma opção interessante para trabalhos científicos, os quais devem ser realizados, sempre que possível, em experimentos em campo, mais representativos da realidade. Incluir estes agrominerais nas práticas de adubação pode tornar-se uma estratégia para elevar a fertilidade do solo e torná-lo mais produtivo, possibilitando a redução do uso de fertilizantes solúveis convencionais e dos riscos ambientais inerentes ao seu uso, podendo também reduzir os custos de produção no campo, sobretudo para os pequenos produtores, muitas vezes à margem da economia nacional, por não terem tanto acesso aos pacotes tecnológicos e não manejarem a fertilidade do solo de modo adequado devido aos custos envolvidos. Fontes agrominerais eficientes, mais acessíveis e de menor custo seriam uma importante forma de aumentar a inclusão social dos pequenos produtores e também um importante fator no fortalecimento da cadeia

de produção de biodiesel, que tem enfrentado problemas quanto à oferta de matérias-primas próximas às unidades de produção do biocombustível.

Os efeitos da rochagem sobre a fertilidade do solo e nutrição mineral das culturas devem ser avaliados por um período mais longo que nos trabalhos com fertilizantes solúveis convencionais. Como os agrominerais apresentam, em geral, solubilidade mais lenta e maior efeito residual, é preciso um bom planejamento experimental para avaliações a médio/longo prazo para caracterizar adequadamente seus efeitos.

Este trabalho foi realizado com o objetivo de testar a viabilidade agronômica da rochagem como adubação complementar para culturas oleaginosas, seguindo uma estratégia de menor uso de fertilizantes solúveis. A hipótese científica assumida foi de que é possível substituir parte das fontes convencionais por fontes agrominerais alternativas por meio da rochagem, sem interferir na produtividade destes cultivos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A agricultura brasileira e a demanda por fertilizantes

A produtividade agrícola nacional responde de forma rápida e efetiva aos fertilizantes convencionais aplicados, assim como aos defensivos agrícolas e às espécies geneticamente modificadas. Mas um fato relevante é que 70% do total dos fertilizantes utilizados no país são derivados de fontes convencionais de nutrientes (FCN) importadas, compostas, essencialmente, de variantes de NPK, de elevada concentração e alta solubilidade (RODRIGUES, 2009). A situação delicada de dependência externa de insumos compartilhada por vários países, inclusive o Brasil, já é motivo suficiente para a busca de alternativas.

Porem, além deste ponto, cita-se a importante oscilação de preços dos fertilizantes, como a alta ocorrida no ano de 2008, o alto custo de transporte e, de modo geral, a realidade do meio rural brasileiro, composto, em sua maioria, por pequenas propriedades, nas quais se pratica a agricultura familiar e ainda não se empregam qualquer tipo de fertilizante. Tudo isso motiva a busca de alternativas mais acessíveis para que o setor agropecuário siga crescendo. Assim, pesquisas de novos caminhos, novos materiais fertilizantes que atendam à qualidade alimentar e à responsabilidade socioeconômica e ambiental são impulsionados em todo o mundo (LAPIDO-LOUREIRO; RIBEIRO, 2009).

2.2 Produção de matéria-prima para biocombustíveis e aumento da demanda por fertilizantes

A diminuição das reservas petrolíferas mundiais e a crescente preocupação mundial por fontes de energia renováveis e menos impactantes ao ambiente projetam um crescimento estimado de 53% no mercado mundial de

agroenergia para as próximas duas décadas. O Brasil, com sua aptidão agrícola e investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias nesta área, já desponta como grande produtor de etanol e vislumbra mesmo desempenho para o biodiesel, com grandes chances de se tornar exportador de energias e tecnologias renováveis. Para isso, é preciso incentivar e investir em pesquisas e tecnologias voltadas para as energias alternativas, como ressaltam Lima e Teixeira (2010).

O crescimento do setor energético ligado aos biocombustíveis, com a previsão de aumento do consumo de álcool e biodiesel, estimula o aumento na produção das matérias-primas para produzi-los. Isto requer uso de insumos, fertilizantes e corretivos para se garantir uma produtividade rentável aos produtores. Mas, o Brasil esbarra em uma produção de fertilizantes insuficiente para atender à demanda interna e, para evitar o agravamento na demanda por fertilizantes, surgiram várias iniciativas, fomentadas pelo governo federal, por meio do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT/FINEP), para o desenvolvimento de novas fontes agrominerais e rotas tecnológicas de produção de fertilizantes. Dentre elas, encontra-se o projeto ROCKAPL – Projetos pilotos do uso de novas fontes e rotas tecnológicas de agrominerais na produção de biocombustíveis líquidos -, coordenado pela Embrapa Cerrados. O objetivo principal deste projeto é avaliar o desempenho de rochas e rejeitos de mineração ou garimpo como fontes regionais de nutrientes, testados por meio de campos experimentais, cultivados com espécies voltadas para a produção de biocombustíveis líquidos.

Dentre as culturas que podem ser utilizadas para a produção de biodiesel, destacam-se a soja, o algodão, a mamona, o pinhão-manso e o amendoim. Algumas outras culturas também começam a fazer parte das pesquisas, mas em menor escala, como é o caso do girassol e do dendê (LIMA; TEIXEIRA, 2010).

A soja é o principal grão produzido no Brasil e ocupa o segundo lugar no mercado internacional, atrás apenas dos EUA. Apesar de possuir teor de óleo menor que de outras espécies oleaginosas (19%), a soja é a principal oleaginosa no país e com a cana-de-açúcar são as duas principais matérias-primas para a produção de biocombustíveis, atualmente. De todo o biodiesel nacional produzido, 80% são provenientes da soja (LIMA; TEIXEIRA, 2010). As áreas produtoras se concentram nos estados do Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás e Mato Grosso do Sul, segundo Lima e Teixeira (2010) e, mais recentemente, foi introduzida no estado de Minas Gerais. Apresenta boa adaptabilidade aos solos brasileiros e o alto nível de conhecimento tecnológico a torna uma cultura altamente competitiva no mercado.

Os nutrientes mais exigidos pela soja são N e K, sendo o primeiro obtido predominantemente por meio do processo de fixação biológica do N atmosférico, uma grande vantagem competitiva da soja produzida no Brasil. Na sequência, vêm P, S, Ca e Mg (BORKERT et al., 1994; EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2011). Para garantir elevada produção de grãos, a soja necessita de algumas condições climáticas, como 450 a 800 mm de água e temperaturas em torno de 30 °C, durante seu ciclo. A adaptação de diferentes cultivares se dá em função das exigências hídricas, térmicas e de fotoperíodo (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2011).

O girassol é apontado como nova opção econômica em sistemas de rotação/sucessão de culturas de grãos para diversas regiões do país (BACKES et al., 2008). Ainda é pouco cultivado na região sul de Minas Gerais, mas apresenta ampla capacidade de adaptação a diferentes condições edafoclimáticas, maior resistência à seca e a baixas temperaturas, quando comparado à soja, ao milho, ao algodão ou ao sorgo (SFREDO; CAMPOS; SARRUGE, 1984), podendo ser cultivado tanto no período da safra como na entressafra. Juntamente com

mamona, amendoim e pinhão-manso, o girassol é apontado como uma das espécies com maior teor de óleo, dentre as oleaginosas, 42% (LIMA; TEIXEIRA, 2010) e de simples extração (YOKOMIZO, 2003).

Souza et al. (1976 citados por SFREDO; CAMPOS; SARRUGE, 1984) consideram que o girassol apresenta boa capacidade em aproveitar o resíduo de adubações anteriores, sendo esta uma grande vantagem para cultivo após soja, milho ou algodão, devido ao baixo custo na produção. Castro e Oliveira (2005) atribuem este bom aproveitamento de adubações anteriores ao sistema radicular profundo do girassol. Este conjunto de características faz do girassol uma cultura apta para o período da safrinha na região sul de Minas Gerais.

2.3 Rochagem como opção para fornecimento de nutrientes

A rochagem é uma técnica de fertilização baseada na adição de pó de determinados tipos de rocha ou minerais com a capacidade de alterar positivamente a fertilidade dos solos sem afetar o equilíbrio do ambiente. Esta técnica é tida como um processo alternativo ou complementar de fertilização e tem sido indicada especialmente para as pequenas propriedades, agricultura familiar e, até mesmo, para agricultura orgânica, conforme Lapido-Loureiro e Nascimento (2009). Na literatura, é possível encontrar alguns sinônimos para o termo rochagem, por exemplo, agrominerais, pó de rocha, petrofertilizantes, remineralização ou fontes alternativas de nutrientes (FAN) (LAPIDO-LOUREIRO; NASCIMENTO, 2009; LAPIDO-LOUREIRO; RIBEIRO, 2009; MARTINS, 2010; THEODORO et al., 2006)

Os pioneiros deste conceito de remineralização do solo são o francês M. Missoux (1853) e o alemão Julius Hensel (1880), ao divulgarem seus trabalhos sobre a utilização de rocha como fonte de nutrientes (LAPIDO-LOUREIRO; NASCIMENTO, 2009; STRAATEN, 2006). Hensel ainda publicou um livro em

1880, intitulado “Bread of stones”, que significa pão proveniente das rochas. Esta linha de pesquisa avançou desde então, com os esforços de vários pesquisadores, como Keller, Fyfe, Leonardos, Chesworth, Straaten, Pride, Gillman, Barak, Weerasuria, Coroneos, Hinsinger, Harley, Gilkes e seus colaboradores (FYFE; LEONARDOS; THEODORO, 2006; LAPIDO-LOUREIRO; NASCIMENTO, 2009; STRAATEN, 2006).

No Brasil, os estudos se iniciaram na década de 1950, por meio de D. Guimarães e Vladimir Ilchenko, seguidos pelo professor Othon Leonardos (UnB), considerado precursor da rochagem no país. As pesquisas se intensificaram entre as décadas de 1970 e 1980, buscando rochas para o fornecimento de K e outros nutrientes às plantas e também rotas alternativas para a obtenção de fertilizantes (COELHO, 2005; CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 2010; RESENDE et al., 2006c). Em função da maior carência de P e K nos solos brasileiros, de modo geral, os estudos com rochas foram direcionados, principalmente, para estes dois nutrientes, não subestimando a importância dos demais no sistema solo-planta.

Na década de 1990, por meio de uma parceria entre a Embrapa Cerrados e a Universidade de Brasília, foram retomados os estudos sobre o uso de rochas como fontes alternativas de potássio em sistemas agropecuários e, atualmente, tais estudos continuam gerando diversas informações relevantes. A busca por novas fontes nutricionais ganha ainda mais importância frente ao crescimento previsto para os cultivos visando à produção de matéria-prima para a produção de biocombustíveis.

Como prova da importância dada a esta linha de pesquisa e do interesse que tem despertado em pesquisadores, instituições e governantes, no ano de 2003 foi criada uma rede interinstitucional de pesquisa, intitulada de Rede Agri-Rocha, coordenada pela Embrapa. Esta rede foi articulada para organizar e desenvolver atividades de avaliação e experimentação com rochas de várias

regiões geográficas do país, buscando ampliar as possibilidades de uso e a viabilidade econômica desses materiais como fontes de K, principalmente (RESENDE et al., 2006c). Um fato marcante, mostrando o fortalecimento das pesquisas sobre a rochagem no país, foi a realização do primeiro Congresso Brasileiro de Rochagem, em 2009, com apresentação de mais de sessenta trabalhos científicos e participação de representantes de diversas áreas de interesse, cujos resultados foram apresentados no Congresso Brasileiro de Rochagem (2010).

A aplicação de agrominerais ao solo caracteriza-se pelos diversos efeitos benéficos proporcionados. Minerais provenientes de rochas ígneas e metamórficas contêm a maior parte dos nutrientes necessários para o crescimento e desenvolvimento de plantas superiores. Em geral, dentre os nutrientes fornecidos pelas rochas estão potássio, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre, além de alguns micronutrientes, elementos benéficos às plantas, como silício e elementos-traços que também podem ser encontrados (MELO; CASTILHOS; PINTO, 2009; STRAATEN, 2006; THEODORO; LEONARDOS; ALMEIDA, 2010).

Para Harley e Gilkes (2000), Martins et al. (2008) e Straaten (2006), o principal desafio no uso de agrominerais como fertilizantes é fornecer os nutrientes nas quantidades e no tempo adequado a cada cultura. A necessidade de usar doses relativamente altas dos agrominerais e com granulometria bem fina para compensar a baixa concentração e baixa solubilidade desses materiais pode aumentar os custos da técnica, segundo Bolland e Baker (2000).

Por outro lado, Leonardos, Theodoro e Assad (2000) relatam que a baixa solubilidade das rochas faz delas um importante componente para a fertilização, principalmente para áreas com problemas de salinidade e locais sujeitos a chuvas frequentes, evitando que os nutrientes sejam rapidamente lixiviados. Para Andrade, Martins e Mendes (2002) e Souza et al. (2010), as aparentes

desvantagens das baixas concentrações e solubilidades dos agrominerais podem ser encaradas na verdade como vantagens em condições tropicais. As rochas, ao sofrerem o intemperismo, liberam gradualmente os nutrientes e geram argilas que elevam a CTC do solo. Conseqüentemente, levam a um enriquecimento dos solos tropicais que, geralmente, se apresentam lixiviados, com baixa fertilidade, baixa CTC (MARQUES et al., 2004; MARTINS, 2010), além de um maior efeito residual.

A maioria das rochas objetos de pesquisas encontradas na literatura é de rochas silicáticas, com distribuição ampla e variável no território nacional (MARTINS et al., 2008). São usadas rochas magmáticas alcalinas, por exemplo, carbonatitos, fotolitos, kimberlitos, kamafugitos e flogopititos, rochas metassedimentares cálcio-silicáticas e produtos de metassomatismo potássico, como micaxistos, biotita xisto, flogopita xisto, biotitito e flogopitito, entre outras (ANDRADE; MARTINS; MENDES, 2002; CASTRO et al., 2006; CRUSCIOL, 2008; MARTINS et al., 2008; MELAMED; GASPAR; MIEKELEY, 2007; MOREIRA et al., 2006, 2009; OLIVEIRA et al., 2006a, 2006b; RESENDE et al., 2006a; SOUZA FILHO et al., 2006; UBIANA et al., 2011).

Entre os diversos silicatos, há grande interesse naqueles que possuem os minerais do tipo flogopita, biotita ou feldspatóides porque contêm K em sua composição, além de outros macronutrientes, como Ca, alguns micronutrientes como Cu e Zn e por apresentarem maior solubilidade (MARTINS et al., 2008; NASCIMENTO; LAPIDO-LOUREIRO, 2004).

Uma das formas de obtenção de vários agrominerais usados na rochagem é por meio do aproveitamento dos subprodutos de mineração e garimpo que, geralmente, são classificados como passivos ambientais para as empresas que os geram (MARTINS et al., 2008). Dar um uso mais nobre a estes materiais é relevante, do ponto de vista ambiental, mas também operacional e socioeconômico, pois facilita a obtenção das matérias-primas e otimiza os

processos produtivos. A técnica da rochagem possibilitaria a interação entre dois setores da economia, a mineração e a agricultura, que, tradicionalmente, não têm ligação e que são considerados, de forma geral, como agentes de degradação ambiental (THEODORO et al., 2006).

A viabilidade agrônômica e econômica de fontes regionais de nutrientes pode reduzir a ocorrência da agricultura migratória, sendo uma boa opção para os pequenos produtores, por serem mais acessíveis e de menor custo, concordando com Theodoro et al. (2006) e Theodoro e Leonardos (2006). Com a consolidação da técnica e a estruturação das cadeias produtivas e de consumo, os agrominerais podem até tornar-se uma alternativa econômica regional, reduzindo, em parte, os impactos da grande importação de fertilizantes minerais (LEONARDOS; THEODORO; ASSAD, 2000).

2.4 Fatores que afetam a eficiência da rochagem

Os minerais têm natureza complexa e, portanto, torna-se necessária a definição de procedimentos analíticos apropriados, que permitam caracterizar satisfatoriamente sua constituição química e a disponibilidade dos elementos presentes, haja vista que as respostas das culturas podem estar associadas não apenas ao nutriente proveniente das rochas, mas a fatores e efeitos conjugados, decorrentes de sua composição (RESENDE et al., 2006c).

Harley e Gilkes (2000) e Martins et al. (2008) sugeriram que as avaliações do potencial de rochas tenham embasamento na sua composição geoquímica, para evitar dúvidas quanto aos resultados das pesquisas. Da mesma forma, Nascimento e Lapido-Loureiro (2004) relataram que a mineralogia pode ser utilizada como indicadora do potencial de solubilidade dos minerais e da capacidade de liberação de nutrientes, dentre eles o K. Conhecer a composição mineral e também geoquímica das rochas é essencial para a escolha de quais têm

maior efeito como fonte de nutrientes. Martins et al. (2008) consideram que a identificação de novas fontes agrominerais deve passar pela caracterização geoquímica, a definição de métodos de processamento e a avaliação econômica sistemática de rochas com potencial para fertilização do solo.

Lapido-Loureiro e Melamed (2009) defendem que deveriam ser realizados, em todo o país, estudos de viabilização da rochagem como processo natural de remineralização, ou seja, de reposição de macro e micronutrientes, recorrendo a vários tipos de rochas. Para isso, Nascimento e Lapido-Loureiro (2004) sugeriram que, primeiramente, deveriam ser executados estudos sistemáticos para inventariar e caracterizar as rochas, rejeitos de minas e escórias da atividade metalúrgica, para a identificação de potenciais fontes agrominerais.

Feito isso, as limitações que poderiam se converter em impedimentos para o amplo uso da rochagem são a distância da fonte até o destino onde o material seria aplicado e/ou a possibilidade de os rejeitos utilizados conterem contaminantes, assunto a ser tratado mais adiante. As rochas brasileiras que apresentam potencial como fontes agrominerais possuem, geralmente, baixas concentrações de nutrientes, mas ampla distribuição geográfica e abundância (CORONEOS; HINSINGER; GILKES, 1996).

Apesar da baixa concentração de nutrientes dos materiais usados na rochagem (CORONEOS; HINSINGER; GILKES, 1996), como normalmente ocorre com as rochas brasileiras, a grande diversidade, associada à grande amplitude de ocorrência destas rochas, aumenta as chances de se obter agrominerais que proporcionem efeitos positivos, quando aplicados como fertilizantes ao solo (THEODORO; LEONARDOS, 2006). Por isso, no Congresso Brasileiro de Rochagem (2010), o Brasil foi classificado como um país “megageodiverso”. Martins (2010) relacionou a ocorrência de rochas silicáticas potássicas com as áreas produtoras de cana-de-açúcar e soja e o que se percebe é uma grande coincidência entre estes locais de ocorrência.

A proximidade entre a área de origem do agromineral e a área de seu uso é um pré-requisito importante a ser respeitado para garantir a viabilidade econômica dos mesmos. Considera-se essencial que o local de aplicação dos agrominerais seja próximo ao seu local de origem, para garantir o baixo custo. E por este motivo, Theodoro e Rocha (2005) propuseram que a distância entre estes pontos não deve ultrapassar 500 km, sob pena de inviabilizar economicamente a técnica. O modelo de exploração a ser seguido deve ser similar ao do calcário, com vários pontos de produção espalhados pelo país, como comentado por Martins et al. (2008) e Resende et al. (2006c).

O intemperismo nada mais é que a alteração (física ou química) que as rochas e minerais sofrem quando em contato com a superfície da Terra, sendo desagregadas e/ou decompostas (TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2001). Melo, Castilhos e Pinto (2009), de maneira genérica, definem que a taxa de intemperismo é afetada pela natureza do mineral, pelo tamanho das partículas e pelas condições ambientais e afeta diretamente a eficiência da rochagem. De modo mais específico, a ação do intemperismo é controlada por fatores como clima, relevo, fauna, flora, material de origem (rocha parental) e pelo tempo de exposição da rocha aos agentes intempéricos, conforme Toledo, Oliveira e Melfi (2001). Por meio da série de estabilidade dos minerais de Goldich é possível se estimar a susceptibilidade ou a resistência dos minerais ao intemperismo com base em sua natureza química, quando estão na fração areia e silte, ou seja, entre 2 e 0,002 mm de diâmetro. A série de estabilidade dos minerais ou, em outras palavras, a sua velocidade de intemperização está ilustrada na Figura 1.

2.5 Processos para aumentar a eficiência no uso de agrominerais

Sabe-se que a velocidade do intemperismo, a solubilidade e a liberação de nutrientes podem ser aceleradas através de mudanças físicas, aumentando a superfície de contato do mineral, por meio de moagem, mudanças químicas, como a acidulação dos minerais e também por processos térmicos, como relata Straaten (2006). Porém, nem sempre estes processos são viáveis, devido ao alto gasto de energia, aos custos elevados ou às dificuldades técnicas de execução em grande escala.

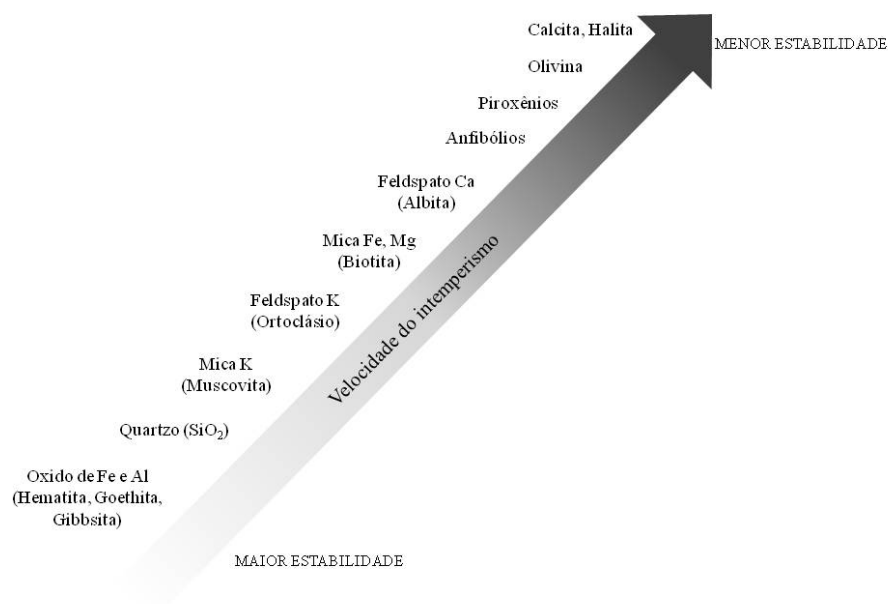


Figura 1 Esquema sobre a estabilidade dos principais minerais e rochas ao intemperismo.

Fonte: adaptado de Lepsch (2011)

A dissolução das partículas dos minerais ocorre principalmente em imperfeições ou fraturas em suas superfícies e a compreensão dessas reações pode levar a procedimentos para controlar a liberação de nutrientes. Em muitos casos, é preciso interferir de algum modo nas taxas de intemperismo para acelerar a liberação dos nutrientes contidos nos minerais. Segundo Theodoro, Leonardos e Almeida (2010), a moagem é o primeiro passo para facilitar a disponibilização dos nutrientes. A redução do tamanho das partículas causa o aumento da superfície de ação dos agentes intempéricos (físicos, químicos e biológicos), aumentando a solubilidade mineral.

Existem alguns resultados sobre tratamentos prévios que buscam elevar a solubilidade das rochas silicáticas. Processos químicos, como a acidificação e térmicos, para a produção de termofertilizantes, mostraram alguns resultados positivos no estudo de novas fontes de potássio e fósforo, comparáveis às fontes convencionais, como retrataram Resende et al. (2006c). Mas, devido à grande variabilidade entre os agrominerais, citada por Congresso Brasileiro de Rochagem (2010), a variação de condições edafoclimáticas brasileiras e as diversas interações que podem ocorrer entre estes e outros fatores, torna-se necessário que o assunto seja mais bem pesquisado.

Nos solos, a dissolução dos minerais é reforçada por um desequilíbrio entre a solução do solo e superfícies minerais por meio da remoção de íons por processos como absorção de nutrientes pelas plantas e lixiviação. A interferência da rizosfera e outras atividades biológicas podem aumentar a dissolução de minerais por meio da liberação de íons H^+ e da complexação realizada por compostos orgânicos que reagem com as superfícies dos minerais (KÄMPF; CURI; MARQUES, 2009).

Os microrganismos do solo, como fungos e bactérias, também são alvos de pesquisas, devido ao potencial que apresentam no processo de solubilização das rochas e liberação dos nutrientes contidos nas mesmas. Em trabalhos como

os de Dalcin (2008), Lopes-Assad et al. (2006, 2010) e Ubiana et al. (2011), mostra-se a importância dos microrganismos para a rochagem e servem de exemplo das diferentes linhas de pesquisa seguidas a partir dos agrominerais no Brasil. A interação com os microrganismos, como ocorre na fixação biológica realizada por bactérias, citada por Basak e Biswas (2008), ou na micorrização feita pelos fungos, como mostram Wallander e Wickman (1999), é extremamente benéfica para a aquisição de nutrientes pelas plantas. Nesse contexto, cita-se a exsudação de ácidos orgânicos, por exemplo, oxálico, cítrico e salicílico, feita pelos fungos ectomicorrízicos, bactérias e pelas próprias plantas na região da rizosfera, que facilita a liberação dos nutrientes da rede cristalina dos minerais (THEODORO; LEONARDOS; ALMEIDA, 2010).

Lopes-Assad et al. (2006), estudando a influência do fungo *Aspergillus niger* na solubilização dos agrominerais rocha ultramáfica alcalina e flogopitito, com conteúdos de K_2O de 3,32% e 5,13%, respectivamente, verificaram, após 21 dias, que o total solubilizado foi maior no tratamento do fungo com a rocha ultramáfica alcalina. Este fungo tem sido descrito como eficiente na solubilização de rochas fosfáticas, graças à produção de ácidos orgânicos que atacam diretamente a rocha.

A interação de fatores, como características dos agrominerais (mineralogia, química, granulometria e solubilidade), características e propriedades do solo (pH, textura, conteúdo de matéria orgânica, presença de microrganismos, umidade) e características da cultura (espécie, ciclo da cultura, exigências nutricionais), dentre outros fatores ambientais e de manejo, certamente influenciam os resultados agronômicos dos agrominerais.

2.6 Respostas à rochagem

Existem estudos preliminares, como o de Theodoro, Leonardos e Almeida (2010), que trazem resultados da experimentação agrícola e a caracterização geoquímica de agrominerais com potencial de uso na rochagem, como carbonatitos, anfíbolitos, micaxistos, rochas fosfáticas sedimentares, biotita xisto e basaltos, entre outros. Alguns resultados têm até indicado a viabilidade técnica de alguns agrominerais, como as pesquisas de Cortes et al. (2010) e Crusciol (2008), usando o fonolito, ou Paçô e Oliveira (2010), testando uma rocha fosfática de origem sedimentar. Porém, são escassos os estudos mais aprofundados, em condições de campo, realizados por instituições oficiais, para que se confirmem as potencialidades dos agrominerais.

Straaten (2006) e Weerasuria et al. (1993 citados por CAMPBELL, 2009) consideraram que o uso das rochas chamadas multielementares seria mais vantajoso que os adubos convencionais, em função do fornecimento de vários nutrientes simultaneamente, presentes nestes agrominerais.

A rochagem também pode atuar na correção da acidez do solo, conforme relatam Priyono e Gilkes (2008) e Theodoro, Leonardos e Almeida (2010). Rochas consideradas básicas, como os basaltos, têm maior efeito alcalinizante, comparadas a rochas ácidas, como os granitos (CAMPBELL, 2009). O fonolito, rocha silicática de origem vulcânica, aplicado ao solo pode gerar aumento no pH de até uma unidade, conforme descrevem Wilpert e Lukes (2003). Corroborando este resultado, Moreira et al. (2006) também verificaram o poder alcalinizante das rochas arenito vulcânico, carbonatito e ultramáfica alcalina sobre um Neossolo Quartzarênico sob condições controladas.

Contudo, existem indicativos de outros benefícios da rochagem, como o aumento da retenção de água no solo, principalmente quando os agrominerais estão associados a compostos orgânicos, possibilitando melhor desenvolvimento

radicular e, conseqüentemente, maior resistência das plantas a adversidades climáticas como os veranicos (ANDRADE et al., 2002; BARBOSA FILHO et al., 2000; MACHADO et al., 2005 citados por RESENDE et al., 2006c). O uso de agrominerais poderia aumentar a mineralização de C e N, beneficiando a ciclagem de nutrientes ao longo do tempo em áreas de florestas, como sugerido por Mersi (1992 citado por CAMPBELL, 2009), mostrando que a rochagem traria condições favoráveis à atividade dos microrganismos do solo.

O uso de biotita, carbonatito e nefelina foi estudado por Bakken et al. (2000) em uma série de quinze ensaios de campo, para testar o fornecimento de K ao longo de três anos de cultivo com pastagem. No terceiro e último ano do estudo, quando nenhum fertilizante potássico foi fornecido, o efeito do carbonatito e da biotita sobre o crescimento da pastagem foi comparável ao do KCl. Os autores observaram que a liberação de K das rochas foi muito lenta para um período de três anos. Porém, ao aumentar o período de avaliação, é mais provável conseguir resultados comparáveis aos obtidos com fontes convencionais de nutrientes.

Theodoro e Leonardos (2006) concluíram que o uso da rochagem permitiu manter produções de milho, arroz, mandioca, cana-de-açúcar e hortifrutigranjeiros equiparáveis às com adubação convencional e, ainda, promover a construção da fertilidade do solo de modo mais sustentável para pequenos produtores familiares no estado de Minas Gerais, ressaltando que a rochagem pode ser mais viável para os pequenos agricultores, que não têm acesso aos recursos e incentivos financeiros e tecnológicos.

A mistura de agrominerais a compostos orgânicos, esterco, lodo de esgoto e restos culturais também tem sido alvo de pesquisas, por permitir a obtenção de materiais mais enriquecidos ou mais equilibrados quanto aos nutrientes necessários à nutrição das plantas. Além disso, podem ser mais

baratos e eficientes, como mostra o trabalho de Biswas (2010), na Índia, com as culturas de batata e soja.

Resende et al. (2006b), avaliando as rochas biotita xisto, brecha alcalina e ultramáfica, aplicadas para cultura do milho num Latossolo Vermelho Amarelo argiloso, observaram que a concentração de K nos tecidos, bem como seu acúmulo nas plantas, aumentou com o incremento das doses dos agrominerais, assim como ocorreu para o KCl. Destaque para a rocha ultramáfica, que apresentou maior eficiência relativa no suprimento de potássio, poder corretivo da acidez e a liberação de outros nutrientes, mostrando que a aplicação de um agromineral pode trazer vários efeitos benéficos ao solo e aos cultivos.

Castro et al. (2006), também testando as rochas biotita e ultramáfica alcalina na fertilização de girassol cultivado em vasos, observaram que a rochagem com estes agrominerais influenciou tanto a produção quanto o acúmulo de K nos tecidos do girassol, com eficiência agronômica comparável à do KCl.

Ribeiro et al. (2010) avaliaram, em vasos, o efeito da aplicação de pó das rochas silicáticas ultramáfica alcalina, brecha piroclástica e flogopitito sobre um Latossolo Amarelo distrófico, pobre em K. Observaram que a rocha ultramáfica e a brecha alcalina se mostraram mais promissoras como fontes de K e ainda liberaram P para o solo. A rocha ultramáfica alcalina também elevou o pH do solo, ressaltando o poder corretivo desta rocha, apesar do importante teor de sódio liberado, assim como também na brecha alcalina.

Culturas diferentes podem levar a resultados distintos quanto à eficiência agronômica dos agrominerais. Esta também foi a conclusão de Smalberger et al. (2010), ao avaliarem a eficiência agronômica de três rochas fosfáticas provenientes da Tunísia, Mali e Togo, sob diferentes dosagens, após um primeiro cultivo com trigo, canola e azevém e um segundo cultivo com trigo.

Contudo, alguns agrominerais apresentam concentrações elevadas de certos elementos que podem levar a situações indesejáveis, como desequilíbrio nutricional tanto no solo como nas plantas cultivadas (MOREIRA et al., 2006) ou, ainda, ao acúmulo de elementos-traços e metais pesados, devido às altas doses utilizadas na rochagem (AMARAL SOBRINHO, 1992 citado por OLIVEIRA et al., 2006a).

Segundo Martins et al. (2008), o efeito danoso de metais e elementos-traços depende, basicamente, da quantidade acumulada e das formas químicas em que se apresentam no solo. A ocorrência de metais pesados em formas solúveis, trocáveis, oclusas, precipitadas ou complexadas é o que define seu potencial poluidor. A Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) adota, como nível de toxidez, o teor de metal pesado que provoque redução de 50% no crescimento de plantas (KING, 1996 citado por MARTINS et al., 2008; RESENDE et al., 2006c). É importante citar que não há registros de problemas relacionados à contaminação ou à toxidez nos estudos realizados no Brasil, como comentado por Martins et al. (2008) e Resende et al. (2006c). Os resultados de Muniz et al. (2007) confirmam a ausência de problemas desta natureza.

De modo geral, os resultados negativos da rochagem, geralmente, estão associados ao ciclo curto das culturas utilizadas como planta-teste, períodos curtos de avaliação, condições climáticas desfavoráveis ao intemperismo, solos estéreis e com baixa atividade microbiana (BAKKEN et al., 2000; BOLLAND; BAKER, 2000; CORONEOS; HINSINGER; GILKES, 1996; HINSINGER; BOLLAND; GILKES, 1996; HINSINGER et al., 2001; SILVA et al., 2008) ou ao próprio agromineral testado como fonte de nutrientes.

2.7 Agrominerais utilizados no presente estudo

Na literatura é possível encontrar muitos estudos realizados com rochas silicáticas (aquelas com predomínio de SiO_2 em sua composição), objetivando seu uso como fonte de nutrientes, principalmente com aqueles minerais com K em sua estrutura. Martins et al. (2008) sintetizaram os resultados das pesquisas já realizadas ao considerar que rochas contendo quantidades razoáveis de flogopita ou biotita podem constituir fontes alternativas de K para uso agrícola. Porém, frente à diversidade geológica brasileira e também à diversidade edafoclimática do país, há espaço para muitas pesquisas sobre o tema, incluindo, além dos minérios já contemplados em estudos anteriores, subprodutos de mineração e rejeitos de processos industriais com potencial para utilização como agrominerais.

O anfibolito é um tipo de inossilicato com composição multinutrientes que tem feito parte da lista de rochas prospectadas em todo país para uso na rochagem (LUZ et al., 2010). Trata-se de uma rocha de origem metamórfica composta, principalmente, por hornblenda, um tipo de anfibólio que apresenta teores elevados de Mg, Fe, Ca e menor teor de Mn e, ainda, resíduo de K. Pode intemperizar-se rapidamente, em condições favoráveis (KÄMPF; CURI; MARQUES, 2009). Esta rocha é atualmente extraída pela empresa CIF Mineração no processo de mineração da cassiterita, para a obtenção de estanho na região de Nazareno, MG.

Já as micas são filossilicatos considerados como as maiores fontes de K, Fe e Mg no solo de ambientes tropicais, porém, são mais estáveis que os demais minerais silicatados (feldspato, anfibólio, piroxênio e olivina). A zinnwaldita é uma rocha também encontrada na região de Nazareno, MG e mais um subproduto extraído pela empresa CIF Mineração. Segundo o professor Alfonso Schrank, do Instituto de Geociência da Unicamp, a zinnwaldita é uma mica lítio-

fluo-ferrífera rica em Li e relativamente rara, mas de ocorrência importante em rochas ácidas, como pegmatitos ricos em Na e Li, junto a turmalina, topázio e cassiterita. Este mineral apresenta em sua composição flúor no lugar de OH e, quanto maior o teor deste elemento nas micas, maior a sua estabilidade, pois o flúor atrai com mais força o potássio que a hidroxila (MELO; CASTILHOS; PINTO, 2009). Espera-se, portanto, maior resistência ao intemperismo deste agromineral, quando aplicado ao solo via rochagem.

Em Poços de Caldas, MG, a Mineração Curimbaba extrai uma rocha vulcânica alcalina como subproduto na mineração de bauxita, o fonolito, com cerca de 8% de K_2O , 1,5% de CaO , 3,4% de Fe_2O_3 e 7% de NaO , que vem sendo empregada em experimentos agrícolas. Devido aos resultados positivos que vem apresentando na aplicação agronômica, o fonolito foi recentemente licenciado como um novo fertilizante, passível de ser comercializado. Esta rocha de textura fina é um tectossilicato que contém, essencialmente, feldspato potássico e feldspatóides (CORTES et al., 2010; LUZ et al., 2010). Os tectossilicatos podem atuar como fontes de K e Ca.

Crusciol (2008) apresentou um relatório técnico sobre o uso do fonolito de Poços de Caldas, MG, em experimentos de campo, mostrando que a substituição total do KCl pela rocha propiciou efeitos semelhantes ao KCl no fornecimento de K e na produtividade em grãos, para as culturas do arroz, feijão, milho e soja. Apesar disso, os feldspatos, em geral, têm o K fortemente retido na sua estrutura cristalina o que os torna, segundo Melo, Castilhos e Pinto (2009), insolúveis aos ácidos fracos que ocorrem normalmente na natureza, dificultando seu uso agrícola como fonte de K em função de sua resistência ao intemperismo. Neste caso, uma granulometria mais fina passa a ser fator preponderante à eficiência da rocha como fonte de nutrientes em curto prazo. A teoria apresentada por Melo, Castilhos e Pinto (2009) contrapõe-se a alguns resultados positivos com o uso do fonolito, gerando dúvidas quanto à eficiência do

material, motivo para a realização de novas pesquisas, visando obter maior entendimento do seu efeito fertilizante.

O micaxisto é uma rocha metamórfica composta, basicamente, por mica, quartzo e minerais acessórios. Apresenta K_2O em sua composição, com potencial para aplicação direta ao solo, principalmente se a mica presente for a biotita. Devido à maior proporção do quartzo, espera-se uma maior estabilidade em relação às micas, quando presentes em fração areia ou silte, intemperizando-se lentamente.

Apesar de grande interesse no Brasil por novos agrominerais para atuarem principalmente como fontes de potássio, há estudos, como os de Paçô e Oliveira (2010) e Smalberger et al. (2010), testando a eficácia de rochas fosfáticas como fontes de P. O fosforito, por exemplo, é uma rocha fosfática sedimentar pertencente ao Grupo Bambuí, encontrada na região de Campos Belos, GO. Possui composição mineralógica intermediária entre a francolita e a fluorapatita, segundo Monteiro (2009). Os fosforitos apresentam, em média, 24% de P_2O_5 total, que justificam seu aproveitamento na rochagem, já que são consideradas marginais para os processos industriais clássicos (LUZ et al., 2010). Há diferenças relevantes no tipo de fosforito, principalmente quanto às concentrações de P_2O_5 , CaO, MgO e SiO_2 , possibilitando a comercialização de alguns tipos como insumos agrícolas, como faz a empresa Itafós Fertilizantes Ltda., em Goiás. Apesar dos indicativos de que o fosforito pode ser aplicado diretamente ao solo como fertilizante, dada a sua menor estabilidade em relação às apatitas (BISSANI et al., 2004), os trabalhos testando sua eficiência ainda são escassos, principalmente em condições de campo.

Compreender plenamente o conjunto e a complexidade biogeoquímica dos agrominerais e do sistema agromineral-solo-planta nos sistemas produtivos da agricultura com rochagem requer muito esforço por parte das instituições de

pesquisa, haja vista as mais diferentes situações e condições edafoclimáticas, espécies/cultivares, nível tecnológico, entre outros.

A realização de trabalhos em condições de campo torna-se necessária para completar a avaliação agrônômica que vem sendo realizada sob condições controladas. Em geral, os experimentos em campo exigem maior esforço para sua instalação e condução; são, geralmente, mais demorados e apresentam maior variabilidade nos resultados, porém, representam melhor a situação real de cultivo comercial.

Este trabalho, portanto, foi realizado com o objetivo de testar a viabilidade agrônômica da rochagem com cinco agrominerais aplicados como adubação complementar para culturas do girassol e da soja, seguindo uma estratégia de uso reduzido de fertilizantes solúveis. Espera-se, dessa forma, que seja possível substituir parte das fontes convencionais por fontes alternativas de nutrientes por meio da rochagem com materiais regionais, sem interferir na produtividade dos cultivos. Para isso, além de comprovar a eficiência agrônômica e a viabilidade econômica dos agrominerais, é preciso que existam políticas de incentivo à técnica, somadas à regulamentação do mercado e à padronização de procedimentos de análises químicas para avaliar o potencial dos agrominerais como fonte de nutrientes (MARTINS et al., 2008).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido sob condições de campo, em sequeiro, numa área situada nas coordenadas geográficas 21° 15' 46'' sul e 44° 30' 48'' oeste, no município de Nazareno, MG, durante o período de janeiro de 2010 a fevereiro de 2011. De acordo com a classificação climática de Köppen, esta região possui um clima do tipo Cwa, com verões quentes e úmidos e invernos secos e frios, com temperatura média de 19,4 °C e 1.500 mm anuais de chuva. A variação média de temperatura e precipitação para a região ao longo do ano pode ser verificada por meio do Gráfico 1, que mostra as normais climatológicas referentes ao período de 1961 a 1990. Os dados de precipitação e temperatura referentes ao período experimental (jan/2010 a jan/2011) são apresentados no Gráfico 2.

Há aproximadamente dez anos, a área estava em condições de subutilização, ocupada com capim braquiária. O solo do tipo Latossolo Vermelho Distrófico típico, argiloso (500 g kg⁻¹ de argila), apresentava pH em água de 5,5; 0,13 mg dm⁻³ de P; 28 mg dm⁻³ de K; 0,6 cmol_c dm⁻³ de Ca; 0,1 cmol_c dm⁻³ de Mg; 5,6 cmol_c dm⁻³ de H+Al; e 4,5 dag kg⁻¹ de matéria orgânica para a camada de 0 a 20 cm de profundidade. Em razão dessas condições de baixa fertilidade, foram realizadas a calagem e a gessagem, com a aplicação de 6 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (39% de CaO e 13% de MgO) e 1 t ha⁻¹ de gesso agrícola (22% de CaO), distribuídos em área total e incorporados, juntamente com a cobertura vegetal, a 30 cm de profundidade, em agosto de 2009.

Foram selecionados cinco agrominerais para o estudo. São eles anfíbolito e zinnwaldita, provenientes da região de Nazareno, MG, concedidos pela empresa CIF Mineração, fonolito extraído pela Mineração Curimbaba, em Poços de Caldas, MG, micaxisto extraído pela Mineração Santa Terezinha-MISTEL, em Brasília, DF, e fosforito explorado pela empresa Itafós Fertilizantes, em Campos Belos, GO.

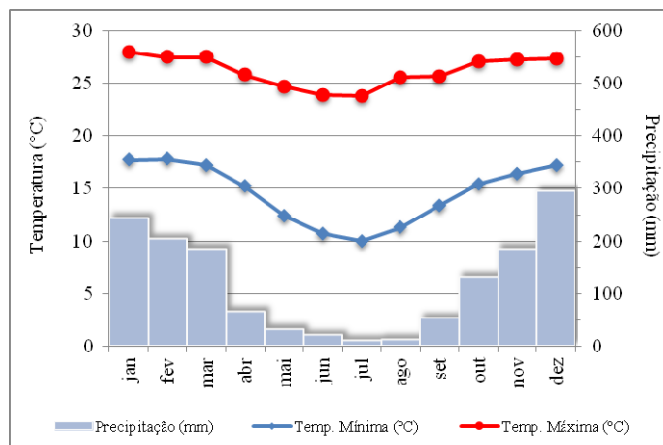


Gráfico 1 Normais climatológicas referentes ao período de 1961 a 1990, para o município de Nazareno, MG. Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (2012)

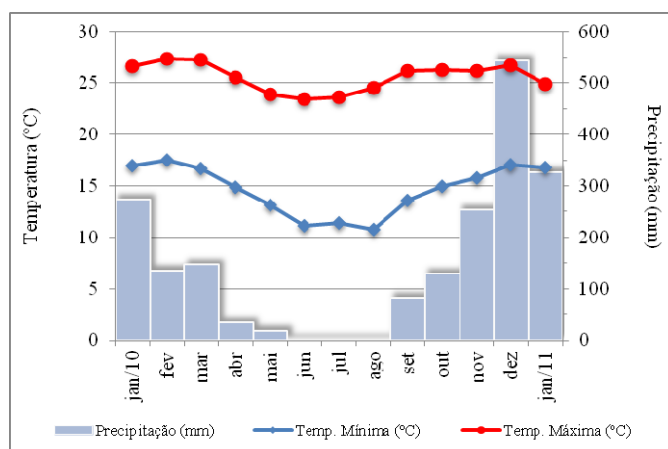


Gráfico 2 Dados climáticos observados durante o período experimental, coletados na estação climatológica de Itutinga, MG. Fonte: Agritempo (2012)

Os agrominerais passaram por análise litogeoquímica, pelos métodos de espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP - EAS) após fusão de lítio metaborato/tetraborato e digestão nítrica diluída para a determinação dos óxidos e elementos principais e de espectrometria de massa com fonte de plasma induzido (ICP - MS), após fusão de lítio metaborato/ tetraborato e digestão em ácido nítrico, para determinar os elementos traços. A composição química das rochas é apresentada, na forma de teores totais, na Tabela 1.

Cabe destacar que os cinco agrominerais utilizados têm Si como o principal elemento constituinte, na forma de SiO_2 . São também de interesse agrônomo os teores de P, Ca, Cu, Zn e Ni na amostra de fosforito; Ca, Mg, Cu e Ni no anfibolito; K, Na e Zn no fonolito; Ca, Mg e K no micaxisto e K na zinnwaldita (Tabela 1).

Após a moagem, os agrominerais apresentaram 100% das partículas com diâmetro inferiores a 2 mm. No entanto, a caracterização granulométrica (Tabela 2) mostrou diferenças quanto à distribuição do tamanho das partículas dos materiais, possivelmente em razão das características diferentes de cada agromineral (dureza, teor de sílica, etc.) e da disponibilidade de equipamento para moagem. Nota-se que a textura apresentada pelo anfibolito, fonolito e zinnwaldita foi mais fina e, para micaxisto e fosforito, mais grosseira. A metodologia utilizada para esta caracterização foi o peneiramento via úmida, conforme Brasil (2007).

Na concepção dos tratamentos, confrontou-se a adubação com fontes convencionais de nutrientes *versus* a adubação com as mesmas fontes substituídas parcialmente por rochas moídas. O tratamento MAP/KCl, tido como referência, recebeu fosfato monoamônico (MAP, com 44% P_2O_5 e 9% N) e cloreto de potássio (KCl, com 60% K_2O) como adubações corretivas. Um tratamento controle, sem adubação corretiva e um com o agromineral fosforito (fonte de P e Ca) mais KCl foram incluídos para fins comparativos (Tabela 3).

Tabela 1 Teores totais de elementos químicos constituintes dos agrominerais estudados

Elemento	Unidade	Agromineral				
		Anfibolito	Fonolito	Fosforito	Micaxisto	Zinnwaldita
SiO ₂	dag kg ⁻¹	51,36	53,95	44,01	42,57	73,82
Al ₂ O ₃	dag kg ⁻¹	13,77	20,95	5,97	12,63	16,44
Fe ₂ O ₃	dag kg ⁻¹	12,72	3,59	2,47	5,66	1,20
MgO	dag kg ⁻¹	7,07	0,27	0,79	8,07	0,44
CaO	dag kg ⁻¹	8,66	1,52	23,85	10,49	0,97
Na ₂ O	dag kg ⁻¹	2,31	7,10	0,02	0,85	3,42
K ₂ O	dag kg ⁻¹	0,58	8,57	1,05	3,47	2,53
P ₂ O ₅	dag kg ⁻¹	0,14	0,06	16,21	0,16	0,12
MnO	dag kg ⁻¹	0,19	0,23	0,15	0,09	0,14
TiO ₂	dag kg ⁻¹	1,07	0,56	0,24	0,75	0,10
Ni	mg kg ⁻¹	131	<20	74	31	<20
Ba	mg kg ⁻¹	100	57	626	830	22
Co	mg kg ⁻¹	46,6	0,5	15,0	16,0	4,2
Mo	mg kg ⁻¹	0,2	3,2	1,8	<0,1	<0,1
Cu	mg kg ⁻¹	155,4	11,8	36,1	14,8	18,3
Pb	mg kg ⁻¹	2,6	21,9	14,6	6,2	1,2
Zn	mg kg ⁻¹	45	130	244	56	32

Tabela 2 Caracterização granulométrica dos agrominerais usados na rochagem

Agromineral	Distribuição das partículas de acordo com a granulometria					
	2 mm	0,84 mm	0,250 mm	0,125 mm	0,075 mm	< 0,075 mm
%						
Anfibolito	0	0	0	0	1	99
Fonolito	0	0	1	2	12	85
Fosforito	0	8	34	8	10	40
Micaxisto	0	0	46	8	12	34
Zinnwaldita	0	0	0	0	0	100

Os demais tratamentos combinaram cada uma das rochas zinnwaldita, anfibolito, micaxisto e fonolito, com o fosforito (fonte de P) substituindo parcialmente as fontes convencionais KCl e MAP (Tabela 3). Nos tratamentos com as combinações de rochagem houve uma redução de 20% na adubação corretiva com KCl e não se aplicou outra fonte de P₂O₅ além do fosforito. A

dosagem para as rochas zinnwaldita, anfíbolito, micaxisto e fonolito foi de 5.000 kg ha⁻¹, escolhida em função dos baixos teores de nutrientes presentes. Já o fosforito foi aplicado na dose de 1.000 kg ha⁻¹, visando o fornecimento de 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅, baseado no teor total presente neste agromineral.

Como o solo apresentava condições de fertilidade bastante restritivas ao desenvolvimento das culturas, optou-se pela aplicação dos tratamentos de rochagem como prática de adubação corretiva, na intenção de elevar o potencial produtivo do solo. Todos os insumos das adubações corretivas foram aplicados a lance e incorporados parcialmente, junto com parte da palhada de braquiária que cobria o solo, por meio de subsolagem a 30 cm de profundidade, no dia 15/01/2010 (Figura 2).

A instalação dos tratamentos foi efetuada em faixas extensas, utilizando equipamentos de grande porte, num talhão que entraria em exploração comercial para a produção de grãos. Em razão disso, na abordagem experimental, foi empregado um delineamento de blocos ao acaso, com repetição dentro do bloco. Foram considerados três blocos para controlar as possíveis variações naturais de fertilidade do solo. Dentro de cada bloco foram tomadas duas repetições georreferenciadas para análise das variáveis respostas.

Os dados foram coletados ao longo de dois cultivos, primeiramente girassol e, na sequência, soja. Foi avaliado o estado nutricional das culturas por meio de análises químicas dos tecidos foliares, a produção de biomassa por meio da massa seca da parte aérea (MSPA) no florescimento e na colheita, o conteúdo de nutrientes acumulados em cada cultivo e a produtividade em aquênios de girassol e grãos de soja. A fertilidade do solo foi acompanhada por meio de análise química, a partir de amostragens na profundidade de 0 a 20 cm.

Tabela 3 Descrição dos tratamentos e das quantidades totais de nutrientes aplicadas como adubações corretivas

Tratamento	Adubação corretiva		Quantidades totais fornecidas				
	Fonte convencional	Rochagem	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
	kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹				
MAP/KCl	MAP + KCl (230 + 207 kg ha ⁻¹)	-	21	101	124	2564	780
Fosforito/KCl	KCl (207 kg ha ⁻¹)	Fosforito (1 t ha ⁻¹)	0	162	124	2803	788
Fosforito/zinnwaldita	KCl (166 kg ha ⁻¹)	Fosforito + zinnwaldita (1 + 5 t ha ⁻¹)	0	162	226	2851	810
Fosforito/anfibolito	KCl (166 kg ha ⁻¹)	Fosforito + anfibolito (1 + 5 t ha ⁻¹)	0	162	129	3236	1141
Fosforito/micaxisto	KCl (166 kg ha ⁻¹)	Fosforito + micaxisto (1 + 5 t ha ⁻¹)	0	162	273	3327	1191
Fosforito/fonolito	KCl (166 kg ha ⁻¹)	Fosforito + fonolito (1 + 5 t ha ⁻¹)	0	162	528	2879	801
Controle	-	-	0	0	0	2564	788

Neste trabalho, buscou-se uma estratégia de baixo investimento em fertilizantes na adubação de manutenção (ou de plantio) das culturas, de modo a evidenciar os efeitos da roçagem. Assim sendo, tanto no cultivo do girassol quanto no da soja, as adubações de manutenção foram intencionalmente reduzidas em 50%, baseadas nas dosagens normalmente utilizadas por produtores que trabalham com elevado investimento em adubos.



Figura 2 Etapas da instalação experimental
Solo com braquiária antes da instalação(A); aplicação dos tratamentos com roçagem (B, C); aspecto da área após a roçagem (D); subsolagem após a aplicação dos tratamentos (E, F)

Em 11 de fevereiro de 2010, foi feita a semeadura de safrinha da cultivar de girassol Charrua, para um estande final de $41.667 \text{ plantas ha}^{-1}$, com uma adubação de manutenção com 200 kg ha^{-1} do formulado NPK 08-24-12, aplicada no sulco de plantio em todos os tratamentos. A dose normalmente recomendada para um alto nível tecnológico seria de 400 kg ha^{-1} desse formulado. Os demais tratamentos culturais foram realizados normalmente pela fazenda, segundo as recomendações de manejo da cultura.

Foi realizada a coleta das folhas diagnósticas de 25 plantas em cada repetição, conforme Castro e Oliveira (2005), no estágio R₇ de desenvolvimento do girassol, de acordo com a classificação proposta por Schneiter e Miller (1981 citados por CASTRO; FARIA, 2005). Nesta ocasião também se coletou a parte aérea de cinco plantas por parcela para a determinação da massa seca produzida (MSPA_{R7}).

Na colheita do girassol, realizada em 23/06/2010, foi feita nova amostragem de plantas para a determinação da MSPA (MSPA_{colh}). Para a avaliação da produtividade, a parcela teve área de 5,4 m², com três linhas de plantio de 3 m de comprimento, espaçadas de 0,6 m, onde foram colhidos apenas os capítulos, mantendo os resíduos culturais na área para minimizar a exportação de nutrientes.

Para a safra 2010/2011, a mesma área foi cultivada com soja, cultivar SYN 1049RR, da empresa Syngenta, de desenvolvimento considerado superprecoce. Em 1º de outubro de 2010, foi realizada a semeadura, com um estande esperado de 250.000 plantas ha⁻¹, e a adubação de manutenção com 200 kg ha⁻¹ do formulado NPK 00-30-15 aplicado no sulco de plantio em toda área. Cabe destacar que a adubação de manutenção para a soja sob alto investimento seria de 400 kg ha⁻¹ de NPK 00-30-15. As sementes foram previamente tratadas com inseticida e inoculadas com *Bradyrhizobium*, dispensando a adubação nitrogenada, conforme recomenda Novais (1999). Os demais tratamentos culturais foram realizados normalmente pela fazenda, segundo as recomendações de manejo da cultura.

No estágio R₂ do desenvolvimento da soja realizou-se a coleta de folhas diagnosticadas em 30 plantas por parcela, conforme recomendação de Boaretto et al. (2009), além da amostragem de plantas para determinar a produção de biomassa (MSPA_{R2}).

A MSPA também foi avaliada na ocasião da colheita ($MSPA_{colh}$), porém, as plantas amostradas já haviam perdido as folhas. A parcela colhida para quantificação da produtividade teve 10 m², referentes a três linhas de plantio de 5,5 m de comprimento, espaçadas de 0,6 m.

A produtividade do girassol foi determinada após debulha manual dos capítulos e ajuste para umidade de 11%. A produtividade da soja foi determinada após secagem ao sol, seguida da separação manual dos grãos e ajuste para umidade de 11%.

Durante o período experimental, foram realizadas quatro amostragens de solo, coletando-se cinco subamostras para cada amostra composta e três amostras compostas para caracterizar cada tratamento, analisadas segundo métodos descritos por Silva (2009). Foram feitas duas amostragens durante o cultivo do girassol, a primeira aos cinco dias após a emergência das plantas (5 DAE), visando caracterizar os efeitos mais imediatos dos tratamentos, e a segunda no estágio da maturação fisiológica, aos 112 DAE. No cultivo da soja, uma primeira amostragem foi feita no período de florescimento, aos 52 DAE, e a segunda, 30 dias após a colheita.

Tanto as folhas diagnósticas quanto as demais partes das plantas de girassol e soja passaram pelas etapas de secagem em estufa de circulação de ar, a 65 °C até atingir massa constante. Em seguida, foi feita a moagem de cada material em moinho Wiley e análise química de tecidos vegetais conforme Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) para determinar o teor de nutrientes e o estado nutricional das culturas. O acúmulo de nutrientes foi obtido multiplicando-se a concentração de cada nutriente pela respectiva massa seca de cada parte.

As análises químicas do solo e dos tecidos vegetais e o processamento das amostras coletadas em campo, como secagem em estufa e moagem foram realizados nos laboratórios do Departamento de Ciência do Solo e no Laboratório de Sementes da Universidade Federal de Lavras.

Os dados de MSPA, teor foliar, acúmulo de nutrientes e produtividade foram analisados estatisticamente, utilizando-se o programa SISVAR (FERREIRA, 2011). Foi aplicado o teste F e os tratamentos foram comparados pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Uma abordagem econômica simplificada para comparar os tratamentos também foi realizada. Por se tratar de um experimento demonstrativo a campo, com fontes agrominerais de composição muito diversas e procedentes de regiões com distância variável em relação à área experimental, a avaliação econômica foi feita por meio de uma simulação de custos dos agrominerais (Tabela 4), mesmo porque a maioria deles ainda não tem comercialização e preço formado.

Tabela 4 Simulação dos custos de adubos e agrominerais usados na formulação dos diferentes tratamentos com rochagem

Insumo	Custo na fazenda ¹ R\$ t ⁻¹	Distância km	Custo do frete R\$ t ⁻¹ km ⁻¹
MAP	1.605,00	150 ²	0,20
KCl	1.430,00	150 ²	0,20
Fosforito	90,00	300 ³	0,20
Zinnwaldita	90,00	300 ³	0,20
Anfibolito	90,00	300 ³	0,20
Micaxisto	90,00	300 ³	0,20
Fonolito	90,00	300 ³	0,20

¹ Cotação de preços dos insumos MAP, KCl e calcário realizada em 24/05/2012. ² Distância real entre a fonte e local de uso do insumo. ³ Distância hipotética entre a fonte e local de uso do insumo

Para formar o preço dos agrominerais utilizou-se o valor do calcário cotado na região de Arcos, MG, em 24/05/2012 (R\$90,00), incluído o frete, para uma distância de até 300 km. MAP e KCl foram cotados na mesma data, em empresa localizada a 150 km de distância da área experimental. Como os demais custos das lavouras são constantes para todos os tratamentos, estes foram

apresentados simplificadaamente como custos das lavouras e se referem aos custos do tratamento das sementes, plantio, adubação de plantio, manejo fitossanitário das lavouras (controle de plantas daninhas, pragas e doenças), colheita, arrendamento da terra e despesas gerais administrativas da fazenda, durante o período experimental. Os resultados da análise econômica foram convertidos em dólar, de acordo com a cotação média da moeda americana de R\$1,67/US\$, em fevereiro de 2011.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Cultivo de girassol na safrinha de 2010

A aplicação dos agrominerais influenciou os atributos químicos do solo logo após sua aplicação e ao longo do tempo de cultivo do girassol. De acordo com os resultados da análise de variância apresentados no Tabela 1A, nota-se que $MSPA_{R7}$, $MSPA_{colh}$, produtividade e acúmulo de P e K, tanto na parte aérea como nos aquênios do girassol, também foram influenciados pelos tratamentos. É possível observar, por meio do coeficiente de variação variando de 13,55% a 28,91% (Tabela 1A), que houve boa precisão, tratando-se de um trabalho em condições comerciais de produção.

4.1.1 Fertilidade do solo no período da safrinha

Os resultados da análise química do solo (Tabela 5) aos 5 dias após a emergência (DAE) do girassol mostram que as condições de fertilidade de uma forma geral eram bastante semelhantes entre os tratamentos, com pH adequado, boa soma de bases (SB) e saturação de bases (V%) adequados a um bom desenvolvimento do girassol, de acordo com os critérios sugeridos por Alvarez et al. (1999). Observa-se também que as maiores limitações da fertilidade neste primeiro momento se deram pela carência de P e B, com concentrações muito baixas e baixas, respectivamente, em todos os tratamentos (Tabela 5).

É possível, porém, observar, na Tabela 5, que, aos 5 DAE, as áreas que receberam fosforito apresentavam concentração de P cerca de três vezes maior que a área adubada com MAP. Os baixos valores de P disponível pelo método de extração Mehlich-1 no solo adubado com fosfato solúvel (MAP) podem ser explicados pelo fator capacidade de fósforo do solo estudado, que pode ser

comprovado ao observar o teor de argila (500 g kg^{-1}) e baixos valores de P remanescente. Como relatado por Novais, Smyth e Nunes (2007), em solos argilosos, em especial aqueles com pH mais elevado, o poder de extração da solução Mehlich-1 pode ser desgastado pelo próprio solo.

Por outro lado, os solos tratados com fosforito (fosfato de cálcio de baixa reatividade) apresentaram teores de P maiores do que o solo tratado com MAP, em função da capacidade do extrator em solubilizar formas inorgânicas de P associado ao cálcio, provavelmente oriundo da própria rocha e, muitas vezes, superestimado.

Já aos 112 DAE, as concentrações de P no solo adubado com fosforito subiram para 20 mg dm^{-3} , em média e esse valor foi cerca de três vezes maior que a média observada aos 5 DAE, o que indica uma solubilização mais lenta do agromineral fosforito. Mesmo com essa aparente vantagem das áreas com fosforito, os teores do P no solo foram classificados como baixos nos tratamentos fosforito/zinnwaldita e fosforito/micaxisto e muito baixa nos demais (ALVAREZ et al., 1999).

As condições típicas dos Latossolos, inicialmente pobres em fósforo, com predomínio de óxidos de ferro e de alumínio na fração argila, favorecem a intensa imobilização do P, demonstrando a necessidade da aplicação de grandes quantidades em toda a área através da fosfatagem corretiva (MELAMED, 2009), a fim de preencher os sítios de adsorção do solo. A aplicação do fósforo a lanço com uma incorporação parcial nesta área de abertura aumentou o contato do P com os sítios de adsorção, reduzindo a sua disponibilidade neste primeiro momento. Para áreas com alto potencial de fixação do P, recomenda-se, além da fosfatagem corretiva visando minimizar os sítios de adsorção, a aplicação localizada de parte do P, a fim de aumentar sua disponibilidade às plantas.

Tabela 5 Atributos químicos do solo até 20 cm de profundidade, sob diferentes tratamentos com rochagem, aos 5 e 112 DAE¹ do girassol

DAE ¹	Tratamento	pH	P ²	K ²	Na	Ca	Mg	H + Al	SB	t	T	V	MO ³	Prem	Zn	Fe	Mn	Cu	B ⁴	S
		H ₂ O	----- mg dm ⁻³ -----	----- mg dm ⁻³ -----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	mg L ⁻¹	-----	-----	-----	-----	-----
5	MAP/KCl	6,1	2	101	7	3,4	0,9	3,0	4,5	4,5	7,5	60,2	3,7	11	2	43	16	1	0	27
	Fosforito/KCl	6,1	7	82	1	2,7	0,9	2,9	3,8	3,8	6,8	56,4	3,3	12	1	43	11	1	0	30
	Fosforito/zinnwaldita	6,3	6	95	1	2,6	0,9	2,8	3,8	3,8	6,6	57,5	3,3	13	1	44	10	2	0	24
	Fosforito/anfibolito	6,2	7	117	3	2,9	0,9	2,7	4,1	4,1	6,8	59,5	4,0	13	1	43	11	2	0	25
	Fosforito/micaxisto	6,1	9	94	13	2,6	0,9	3,1	3,7	3,7	6,9	54,5	3,3	13	1	47	12	2	0	24
	Fosforito/fonolito	6,1	8	102	96	2,3	0,7	3,1	3,3	3,3	6,5	51,4	3,5	14	1	47	10	2	0	29
	Controle	6,3	1	58	3	2,5	0,8	2,8	3,4	3,4	6,2	54,4	3,5	12	1	40	13	2	0	34
112	MAP/KCl	6,7	2	41	1	3,0	1,0	2,1	4,1	4,1	6,2	66,4	3,8	11	2	51	25	1	0	11
	Fosforito/KCl	6,7	16	69	1	2,8	1,2	2,6	4,2	4,2	6,8	61,7	4,4	10	2	58	17	1	0	23
	Fosforito/zinnwaldita	6,6	22	59	2	2,6	1,2	2,6	4,0	4,0	6,5	60,4	3,8	11	2	54	14	1	0	17
	Fosforito/anfibolito	6,5	20	66	2	2,5	1,3	2,9	4,0	4,0	6,9	57,8	4,0	10	2	54	20	2	0	38
	Fosforito/micaxisto	6,6	24	73	1	2,7	1,3	2,3	4,2	4,2	6,5	64,4	4,0	11	2	57	34	2	0	29
	Fosforito/fonolito	6,9	20	103	166	3,0	1,2	1,7	4,5	4,5	6,1	72,9	3,8	11	2	43	23	2	0	13
	Controle	6,8	3	48	6	2,4	1,0	2,1	3,5	3,5	5,6	62,9	4,0	13	1	46	19	2	0	20

¹DAE - dias após emergência do girassol no campo. ²Fósforo e potássio extraídos por Mehlich-1. ³MO - matéria orgânica. ⁴Boro extraído por água quente

Além de P, as áreas adubadas com fosforito/KCl, fosforito/zinnwaldita, fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito apresentaram concentração de Mg e Zn superiores às encontradas nos tratamentos controle e MAP/KCl aos 112 DAE (Tabela 5). Cabe destacar a maior concentração de Mg sob os tratamentos fosforito/anfibolito e fosforito/micaxisto, apesar de todas serem classificadas como disponibilidade adequada, conforme Alvarez et al. (1999). Com base na análise geoquímica das rochas (Tabela 1) e na disponibilidade de Mg no solo (Tabela 5), é coerente afirmar que anfibolito e micaxisto podem contribuir para o fornecimento de Mg.

Nas amostragens, aos 5 DAE e aos 112 DAE, do girassol, observou-se que o teor de K no solo das áreas adubadas com anfibolito, micaxisto e fonolito foi equivalente ou superior ao teor nas áreas com KCl (Tabela 5), conforme os critérios de Alvarez et al. (1999). Aos 112 DAE, o teor de K no solo com fonolito alcançou 103 mg dm^{-3} , teor classificado como alto. Apenas no tratamento fosforito/fonolito se observou uma disponibilidade de K maior na amostragem aos 112 DAE, que pode ser devido à menor extração pelo girassol com menor produção de biomassa em relação à área adubada com KCl (Tabela 7) e/ou uma solubilização mais gradual do fonolito. Esse tratamento também proporcionou uma alta concentração de Na no solo nas duas ocasiões amostradas, chegando a 165 mg dm^{-3} aos 112 DAE.

O teor de Cu no solo tratado com fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito foi maior que no solo tratado com MAP/KCl, aos 112 DAE. Os agrominerais, exceto zinnwaldita, apresentaram efeito multinutrientes, conforme citado por Martins et al. (2008), com contribuições de K, Mg, Zn e Cu comprovadas por meio da análise química do solo durante o cultivo do girassol.

Com base na série de estabilidade dos minerais, proposta por Goldich (Figura 1), são feitas, a seguir, algumas considerações sobre os tratamentos que se destacaram na fertilidade do solo durante o cultivo do girassol. A menor resistência da hornblenda ao intemperismo, principal constituinte do anfíbolito, explica seus resultados mais rápidos frente às demais rochas.

A adubação com fosforito/micaxisto possibilitou concentração de K praticamente igual à obtida no solo tratado com MAP/KCl aos 5 DAE e 80% mais K na segunda amostragem aos 112 DAE (Tabela 5). A rocha micaxisto tem percentuais expressivos de CaO, MgO e K₂O de 10,5%, 8,1% e 3,5%, respectivamente e, dentre as rochas, possui o menor teor de SiO₂ (42,6%) (Tabela 1). Os números mostram que o intemperismo da micaxisto não é tão lento e pode mostrar resultados positivos já no primeiro cultivo.

O fonolito é a rocha com maior teor de K₂O, com 8,57% (Tabela 1). Tem ainda 1,52% de CaO e 3,59% de Fe₃O₂ em sua composição geoquímica, além de elevadas concentrações de Zn (130 mg kg⁻¹), Na (7,1%), Al₂O₃ (20,95%) e Pb (21,9 mg kg⁻¹), que justificam uma atenção quanto aos efeitos e acúmulo no ambiente. A concentração diferenciada de K e a dissolução mais gradual dos feldspatos (Figura 1) fazem do fonolito uma rocha com bom potencial como fonte de K, com a expectativa de apresentar maior efeito residual, comparado às demais rochas.

4.1.2 Nutrição mineral do girassol

4.1.2.1 Estado nutricional do girassol

Na análise do estado nutricional das plantas de girassol no estágio R₇, percebe-se que N, P, K e B estavam abaixo dos níveis de suficiência propostos por Castro e Oliveira (2005). Mesmo com teor de K abaixo da faixa considerada

ideal, a substituição de 20% do KCl da adubação corretiva por zinnwaldita, anfíbolito, micaxisto ou fonolito não teve efeito no teor de K das folhas. Destaca-se que as folhas de girassol foram coletadas no estágio reprodutivo R₇. No entanto, a literatura recomenda que essa coleta seja realizada no início do florescimento (estádio R_{5,5}), o que pode ter influenciado a interpretação dos teores foliares. É possível que parte dos nutrientes considerados móveis na planta como N, P, K e Mg tenha sido redistribuída, resultando nas menores concentrações observadas em relação aos valores de referência para a cultura (Tabela 6), segundo Castro e Oliveira (2005).

Os demais nutrientes se apresentaram em bons teores na planta, com exceção do Fe, que apresentou teores muito acima dos valores de referência (Tabela 6). Estes valores de Fe são coerentes quando se trata de Latossolos, geralmente ricos em óxidos de ferro e também pelas expressivas concentrações de Fe em diversas rochas testadas (Tabela 1).

Os teores foliares das plantas tratadas com MAP/KCl foram utilizados como referência para comparação com os teores foliares dos demais tratamentos. Sob esta ótica, os teores foliares de N, P e Ca das plantas do tratamento fosforito/anfíbolito se igualaram aos teores do tratamento referência. Já os teores foliares de B, Cu e Zn superaram os do tratamento MAP/KCl (Tabela 6).

A concentração foliar de P não se modificou com a aplicação do fosforito (Tabela 6), embora a análise do solo tenha indicado altos teores de fósforo disponível. Sabe-se que o extrator Mehlich-1 pode superestimar os valores de P no solo adubado com fosfato de baixa solubilidade, uma vez que tem capacidade de solubilizar formas inorgânicas de P não disponíveis para as plantas. Portanto, pode-se dizer que o extrator Mehlich-1 não foi adequado para determinação do P disponível no solo adubado com fosforito porque as análises do solo não refletiram os teores de P nas plantas de girassol.

Tabela 6 Teores foliares de nutrientes no estágio R₇ do girassol, sob diferentes tratamentos com rochagem

	Tratamentos							Nível suficiente ¹
	MAP/ KCl	Fosforito/ KCl	Fosforito/ zinnwaldita	Fosforito/ anfíbolito	Fosforito/ micaxisto	Fosforito/ fonolito	Controle	
	g kg ⁻¹							
N*	26,7 a	25,3 b	26,8 a	27,7 a	24,7 b	24,2 b	24,5 b	35-50
P**	2,0 a	1,6 b	1,7 b	1,8 a	1,7 b	1,6 b	1,9 a	2,9-4,5
K	6,4 a	6,5 a	6,5 a	6,6 a	6,5 a	6,9 a	6,2 a	31-45
Ca**	32,7 c	28,8 c	26,2 c	31,9 c	37,2 b	37,3 b	46,5 a	19-32
Mg**	8,9 b	4,9 d	5,2 d	6,2 c	6,6 c	7,1 c	12,6 a	5,1-9,4
S**	8,5 a	8,1 a	6,3 b	6,2 b	6,3 b	7,1 b	7,8 a	3,0-6,4
	mg kg ⁻¹							
B	12,1 a	14,5 a	15,4 a	17,8 a	20,7 a	20,0 a	17,5 a	35-80
Cu	39,2 a	35,1 a	40,3 a	44,5 a	38,7 a	38,7 a	41,3 a	24-42
Fe	567,5 a	697,1 a	675,4 a	557,4 a	731,9 a	632,7 a	830,1 a	120-235
Mn	152,7 a	120,6 a	131,1 a	144,1 a	124,9 a	117,6 a	131,6 a	55-180
Zn**	31,1 b	54,9 a	44,9 a	49,0 a	48,6 a	49,7 a	56,1 a	29-43

¹Faixa de suficiência para a cultura do girassol no período do florescimento. Fonte: Castro e Oliveira (2005), baseado no trabalho de Raij et al. (1997). *Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. **Significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F. Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si, segundo o teste de Scott-Knott (p<0,05)

O acréscimo de P via fosforito na dose de 1 t ha⁻¹ mostrou certa vantagem nas concentrações de P no solo, mas não interferiu nas demais variáveis analisadas. Esta situação pode indicar a formação de um estoque de fósforo a ser disponibilizado a médio/longo prazo e um possível efeito residual em função de sua disponibilização mais lenta e gradual para as plantas em sucessão.

Andrade, Martins e Mendes (2002) também detectaram esta interferência do extrator ao avaliarem o P disponível no solo após rochagem com um carbonatito em área de pastagem. Por outro lado, Resende et al. (2006a) consideraram que o extrator Mehlich-1 proporcionou boas predições do K disponível no solo adubado com as rochas biotita xisto, brecha alcalina e ultramáfica alcalina. Isso indica que não há um consenso sobre metodologias mais adequadas para tratar sobre o tema rochagem até o momento, demandando mais esforços para defini-las.

A aplicação do fosforito elevou o teor de Zn nas amostras foliares para concentrações superiores às obtidas para o tratamento MAP/KCl (Tabela 6). Este efeito foi devido ao caráter multinutriente do agromineral que apresenta os maiores teores de P, Ca e Zn entre as rochas estudadas (Tabela 1).

O teor de Ca nas plantas adubadas com fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito foram superiores aos demais tratamentos, mas inferiores ao do tratamento controle. O efeito conjugado da presença do Ca na composição química do fosforito e micaxisto pode explicar o teor foliar de Ca observado na área adubada com fosforito/micaxisto (Tabela 1).

A avaliação dos resultados de MSPA no estágio R₇ mostrou que não houve diferença entre a biomassa produzida no tratamento MAP/KCl e os tratamentos com rochagem, mas estas foram superiores à MSPA obtida no tratamento controle (Tabela 7). As plantas de girassol no tratamento controle cresceram menos e concentraram os nutrientes absorvidos numa menor massa

foliar. Assim, os maiores teores de nutrientes observados nas amostras do tratamento controle são explicados pela menor produção de matéria seca de parte aérea (Tabela 7), ou efeito de concentração (FAQUIN, 2005; MARSCHNER, 1995).

Apesar de não ter havido diferenças no teor foliar de Cu entre os tratamentos, o valor apresentado pelas amostras adubadas com fosforito/anfibolito na Tabela 6 chamou a atenção por ser o maior dentre os demais ($44,5 \text{ mg kg}^{-1}$) e, ainda, por estar acima da faixa de suficiência para o girassol, segundo Castro e Oliveira (2005). A concentração do micronutriente na rocha anfibolito é de 155 mg kg^{-1} (Tabela 1), cerca de dez vezes maior que nas demais rochas, justificando a alta absorção pelas plantas.

4.1.2.2 Matéria seca da parte aérea e produtividade do girassol na safrinha de 2010

Os tratamentos MAP/KCl, fosforito/anfibolito e fosforito/micaxisto proporcionaram as maiores produções de biomassa de parte aérea na época da colheita do girassol (Tabela 7). Como o girassol é considerado uma cultura com grande capacidade de acumular nutrientes, sobretudo K, e com pequena exportação (CASTRO; OLIVEIRA, 2005), a manutenção dos restos culturais pode contribuir diretamente para a melhoria das condições da fertilidade do solo. Observou-se que as plantas de girassol perderam parte das folhas e também parte dos aquênios predados por aves, contribuindo para os menores valores de biomassa que os observados na primeira amostragem no estágio de desenvolvimento R₇, aos 85 DAE (Tabela 7).

Nesse primeiro cultivo com girassol, observou-se a superioridade dos tratamentos fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito com resultados de MSPA ao fim do ciclo semelhantes aos obtidos com a adubação de

MAP/KCl e superiores ao do controle (Tabela 7), mostrando que, apesar da baixa concentração dos nutrientes e da restrita solubilidade das rochas, foi possível obter uma nutrição equiparável usando a rochagem em complemento à adubação convencional, dentro de uma estratégia de menor uso de insumos. Essa estratégia é uma tentativa de atender ao agricultor familiar, que deverá responder por parcela significativa da produção de matéria-prima para o biodiesel, conforme prevê o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel. Mas, para que isso ocorra, é necessário que práticas mais acessíveis e de menor custo sejam implementadas.

Tabela 7 Valores médios referentes à produção de biomassa e produtividade do girassol sob diferentes tratamentos com rochagem

Tratamento	MSPA _{R7}	MSPA _{colh} ¹	Produtividade
	kg ha ⁻¹		
MAP / KCl	7808 a	3733 a	1804 a
Fosforito/KCl	7275 a	2641 b	868 c
Fosforito/zinnwaldita	8196 a	3086 b	1288 b
Fosforito/anfibolito	7850 a	3435 a	1665 a
Fosforito/micaxisto	7159 a	3376 a	1567 a
Fosforito/fonolito	7488 a	3065 b	1405 a
Controle	5260 b	2612 b	1174 b

¹Parte aérea do girassol no período da colheita composta por caule, folhas, capítulos e aquênios. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$)

A produtividade observada no tratamento MAP/KCl no cultivo do girassol se deve à alta solubilidade destas fontes que disponibilizaram os nutrientes de forma mais imediata no solo. Apenas neste tratamento houve o aporte de N, através do MAP, o que pode ter conferido vantagem para a produtividade obtida. Além disso, o solo encontrava-se, de forma geral, com

níveis de nutrientes baixos a muito baixos e não foi manejado adequadamente em anos anteriores.

A lenta taxa de dissolução apresentada pelas rochas foi a principal desvantagem citada por Harley e Gilkes (2000) a respeito da técnica da rochagem. Para Hinsinger, Bolland e Gilkes (1996), o curto período para a avaliação interferiu diretamente nos resultados da rochagem. No entanto, o desempenho obtido com os tratamentos fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito já no primeiro cultivo está de acordo com a série de estabilidade dos minerais e rochas (Figura 1), que mostra que o agromineral anfibolito é a rocha menos estável dentre as estudadas. A dissolução mais lenta das rochas micaxisto (mica e quartzo predominantemente) e fonolito (feldspato) levou a uma produtividade inferior nos tratamentos fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito, quando comparada à dos tratamentos MAP/KCl e fosforito/anfibolito.

A rochagem com fosforito/zinnwaldita não interferiu na produtividade do girassol, levando a um valor semelhante ao obtido no tratamento controle neste primeiro cultivo (Tabela 7). O desempenho inferior do tratamento fosforito/zinnwaldita quanto à produtividade é coerente com a composição pobre da zinnwaldita que, apesar de o teor de K_2O ser superior ao da rocha anfibolito, tem o agravante da alta concentração de SiO_2 (73,8%), como visto na Tabela 1, dificultando, inclusive, a obtenção da rocha em pó. O potássio contido em certas micas está tão fortemente ligado à sua estrutura, que é praticamente indisponível para as culturas, conforme relatam Melo, Castilhos e Pinto (2009). No caso da zinnwaldita, uma mica lítio-fluo-ferrífera, estes autores alertam que quanto maior o teor de flúor nas micas maior é sua estabilidade ou resistência ao intemperismo.

A adubação incluindo a rochagem com fosforito nas dosagens utilizadas não foi adequada para um bom suprimento de P ao girassol e, certamente, o P foi

um dos limitantes da produtividade neste primeiro cultivo. A ausência de um manejo do solo em anos anteriores, notada pela condição de baixa fertilidade inicialmente apresentada, somada à alta fixação de P, geralmente observada nos Latossolos, certamente interferiu na eficiência das adubações e nos resultados do cultivo.

É importante destacar que se trata de um cultivo de safrinha num solo com baixa fertilidade natural e quimicamente degradado por práticas de manejo há, aproximadamente, 10 anos. As produtividades obtidas com os tratamentos fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e convencional foram superiores a 1.500 kg ha⁻¹, valor esperado para solos de baixa fertilidade em Minas Gerais, conforme a Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG (1999). Silva et al. (2007) cultivaram girassol na região de Lavras, MG (próximo ao local do presente trabalho), em sistema de sequeiro, no período da safrinha, porém, com população de 62.500 plantas ha⁻¹, obtendo produtividade média de 1.924 kg ha⁻¹.

4.1.2.3 Acúmulo de nutrientes na parte aérea do girassol

Os conteúdos de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu e Zn na parte aérea das plantas de girassol (caule, folhas remanescentes, capítulo e aquênios) foram influenciados pelos diferentes tratamentos aplicados (Tabela 8). As plantas adubadas com MAP apresentaram um maior conteúdo de P que aquelas adubadas com o fosforito. Isso mostra que o P observado no solo adubado com fosforito estava sob formas de baixa solubilidade (fosfato de cálcio) somente detectadas devido ao caráter ácido do extrator Mehlich-1. Apenas as plantas adubadas com fosforito/anfibolito e fosforito/micaxisto acumularam mais P, quando comparadas às plantas do tratamento controle (Tabela 8).

Tabela 8 Acúmulo de nutrientes na parte aérea do girassol (caule, folhas, capítulos e aquênios) na época de colheita, sob diferentes tratamentos com rochagem

	Tratamentos						
	MAP/ KCl	Fosforito/ KCl	Fosforito/ zinnwaldita	Fosforito/ anfíbolito	Fosforito/ micaxisto	Fosforito/ fonolito	Controle
	kg ha ⁻¹						
N**	69,4 a	45,4 b	53,5 b	64,7 a	60,6 a	56,4 b	47,2 b
P**	8,7 a	3,9 c	5,5 c	6,7 b	6,5 b	5,6 c	5,2 c
K**	48,4 a	36,5 b	40,1 a	41,8 a	43,2 a	44,0 a	31,5 b
Ca**	30,6 a	22,5 b	22,9 b	24,6 b	27,4 a	24,3 b	21,4 b
Mg**	14,0 b	8,1 b	9,8 b	10,8 b	10,4 b	12,1 b	19,8 a
S*	8,9 a	6,6 a	7,9 a	9,1 a	10,5 a	8,5 a	7,6 a
	g ha ⁻¹						
B	101,5 a	81,4 a	85,8 a	83,5 a	92,0 a	88,8 a	83,3 a
Cu*	53,3 b	43,5 b	52,1 b	59,2 b	74,7 a	57,5 b	55,6 b
Fe	954,5 a	116,2 a	969,7 a	885,7 a	1127,5 a	804,5 a	949,1 a
Mn	165,3 a	152,3 a	159,5 a	165,4 a	177,8 a	144,4 a	131,2 a
Zn**	104,5 b	82,5 b	104,4 b	129,3 a	113,2 a	101,8 b	97,2 b

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. **Significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F. Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si, segundo o teste de Scott-Knott (p<0,05)

Quanto ao acúmulo de K, notou-se um maior conteúdo do nutriente nas plantas de girassol adubadas com MAP/KCl, fosforito/zinnwaldita, fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito, quando comparado ao do tratamento controle. Portanto, pode-se inferir que os agrominerais zinnwaldita, anfibolito, micaxisto e fonolito forneceram parte do K às plantas.

O acúmulo de K, Mg, S, B, Cu e Zn na parte aérea do girassol tratado com fosforito/fonolito foi equivalente ao do tratamento com MAP/KCl (Tabela 8). Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Crusciol (2008), que substituiu todo KCl por fonolito baseado na quantidade de K_2O e não observou diferenças na produtividade das culturas arroz, feijão, milho e soja, ao comparar as duas fontes.

O tratamento fosforito/micaxisto possibilitou um acúmulo de Ca nas plantas semelhante ao obtido naquelas adubadas com MAP/KCl e um acúmulo de Cu e Zn superior ao obtido nas plantas de todos os outros tratamentos, exceto fosforito/anfibolito, as quais apresentaram acúmulo de Zn equivalente.

De modo geral, as plantas de girassol adubadas com fosforito/anfibolito mostraram os mesmos valores de acúmulo de nutrientes daquelas que receberam MAP/KCl, exceto pelo menor acúmulo de P e Ca e pelo maior acúmulo de Zn (Tabela 8).

4.1.2.4 Acúmulo de nutrientes nos aquênios do girassol

Conforme se verifica nos dados da Tabela 9, houve influência dos tratamentos no acúmulo de todos os nutrientes nos aquênios de girassol. Os aquênios produzidos nas áreas adubadas com fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito acumularam N, K e Cu tanto quanto na adubação de MAP/KCl e superaram o observado no controle.

Tabela 9 Acúmulo de nutrientes nos aquênios de girassol sob diferentes tratamentos com rochagem

	Tratamentos						Controle
	MAP/ KCl	Fosforito/ KCl	Fosforito/ zinnwaldita	Fosforito/ anfíbolito	Fosforito/ micaxisto	Fosforito/ fonolito	
	kg ha ⁻¹						
N**	45,6 a	23,1 b	32,4 b	42,6 a	38,6 a	35,4 a	27,5 b
P**	7,2 a	2,6 c	4,2 c	5,5 b	5,0 b	4,4 c	3,9 c
K**	11,3 a	4,9 c	7,6 b	9,3 a	9,8 a	8,4 a	7,4 b
Ca*	3,5 a	1,1 b	1,4 b	2,4 a	2,5 a	1,6 b	1,3 b
Mg**	4,0a	1,4 b	2,3 b	3,6 a	2,8 b	2,3 b	1,9 b
S**	4,6a	2,3 b	3,3 b	4,3 a	4,9 a	3,6 b	3,1 b
	g ha ⁻¹						
B**	15,3 a	8,5 b	10,9 b	14,7 a	12,7 a	12,0 b	10,1 b
Cu*	30,0 a	17,7 b	24,3 b	31,7 a	37,2 a	27,3 a	21,4 b
Fe**	51,0 a	24,7 b	30,6 b	53,8 a	42,9 a	30,3 b	28,4 b
Mn*	9,9 a	6,4 b	8,5 b	10,4 a	11,9 a	9,1 b	7,6 b
Zn**	74,9 a	46,3 b	65,7 a	85,5 a	76,8 a	72,1 a	57,1 b

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. **Significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F. Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si, segundo o teste de Scott-Knott (p<0,05)

Houve um maior acúmulo de Ca, S, B, Fe e Mn nos aquênios das parcelas adubadas com MAP/KCl, fosforito/anfibolito e fosforito/micaxisto. Os aquênios produzidos com a adubação de MAP/KCl e fosforito/anfibolito apresentaram maior acúmulo de Mg que os aquênios obtidos no controle.

O tratamento fosforito/KCl proporcionou menores acúmulos de nutrientes nos aquênios e nas plantas de girassol, de modo geral. É provável que a alta disponibilidade do K proveniente do KCl tenha inibido competitivamente a absorção de Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn (Tabela 9). Outra possível explicação se refere à assincronia na liberação dos nutrientes pelo KCl e pelo fosforito. Uma vez que o fosforito libera nutrientes de forma mais gradativa, diferentemente do KCl, as exigências do girassol podem não ter sido atendidas no momento adequado.

4.2 Cultivo da soja na safra 2010/2011 e efeito residual dos tratamentos

A rochagem, como técnica de fertilização complementar, seria uma forma de garantir um maior estoque desses nutrientes para abastecimento da solução do solo, à medida que os nutrientes de fontes solúveis fossem demandados pelas plantas, adsorvidos e/ou perdidos com a lixiviação e erosão.

No cultivo da soja na safra 2010/2011 em sucessão ao girassol, foram observados efeitos significativos da aplicação dos agrominerais. Cabe lembrar que a soja foi cultivada buscando observar o efeito residual dos tratamentos aplicados antes do cultivo do girassol. Foram observados efeitos significativos no teor de nutrientes nas folhas, no acúmulo de nutrientes na parte aérea da soja na ocasião da colheita, no acúmulo de nutrientes nos grãos, na MSPA e na produtividade (Tabela 1B).

4.2.1 Fertilidade do solo na safra da soja 2010/2011

Os teores de P, K, Ca, Mg, Zn, Cu e S no solo, antes do cultivo da soja (Tabela 5), demonstram o processo de construção da fertilidade, quando comparados aos teores observados inicialmente na área experimental. Algumas diferenças influenciadas pelos tratamentos ficaram evidentes, como os maiores teores disponíveis de P, K, Mg e Zn.

Aos 56 DAE da soja, o solo adubado com MAP/KCl apresentou baixo teor de P disponível, médio teor para K, Mg, Zn, SB e V% e teor adequado apenas para Ca e S (Tabela 10), segundo as classes de interpretação propostas por Alvarez et al. (1999). Nas áreas com rochagem, os teores de K no solo foram superiores aos obtidos no tratamento referência, com destaque para o solo que recebeu fonolito, atingindo níveis adequados. O solo tratado com fosforito/anfibolito apresentou níveis médios de P, K, Zn, Cu e V% e níveis bons de Ca, Mg, S e SB. Na área tratada com fosforito/micaxisto, podem-se observar níveis médios de P e K e níveis adequados de Ca, Mg, Zn, Cu, S, SB e V%. Na adubação com fosforito/fonolito, foram observados níveis médios de Zn, SB e V% e níveis adequados de K, Ca, Mg, Cu e S. O solo do tratamento controle apresentou nível muito baixo de P, baixo de V% (apesar da calagem e gessagem realizadas), médios de K, Mg e SB e adequados de Ca, Mn e S.

O solo que recebeu fosforito apresentou disponibilidade média de P durante o cultivo da soja, exceto as áreas com fosforito/KCl e fosforito/fonolito, com disponibilidade muito baixa e baixa, respectivamente, aos 56 DAE, período de maior demanda de nutrientes pelas plantas (Tabela 10). Novais e Smith (1999) consideram que o fósforo proveniente de fontes de maior solubilidade pode ser fixado (indisponibilizado às plantas) mais facilmente do que aquele P proveniente de fontes menos solúveis, que será liberado de forma mais lenta.

Tabela 10 Atributos químicos do solo até 20 cm de profundidade, sob diferentes tratamentos com rochagem, amostrado durante o cultivo da soja

DAE ¹	Tratamento	pH	P ²	K ²	Na	Ca	Mg	H+Al	SB	t	T	V	MO ³	Prem	Zn	Fe	Mn	Cu	B ⁴	S
		H ₂ O	---- mg dm ⁻³ ---				----- cmol _c dm ⁻³ -----					---- % ----	mg L ⁻¹	----- mg dm ⁻³ -----						
56	MAP/KCl	6,4	5	50	1	2,6	0,9	2,5	3,6	3,6	6,1	58,9	3,8	11	1	56	14	1	0	21
	Fosforito/KCl	6,2	4	54	1	2,8	1,0	3,0	3,9	3,9	6,9	56,2	4,1	8	2	54	10	1	0	24
	Fosforito/zinnwaldita	6,3	11	57	2	2,7	1,1	2,8	3,9	3,9	6,7	58,2	3,6	11	1	49	8	1	0	23
	Fosforito/anfibolito	6,3	11	69	2	2,5	1,1	2,9	3,8	3,8	6,7	56,2	4,1	10	1	49	15	1	0	24
	Fosforito/micaxisto	6,3	12	67	2	2,8	1,3	2,7	4,2	4,2	6,9	60,9	3,9	10	2	55	21	1	0	30
	Fosforito/fonolito	6,3	5	80	58	2,4	1,0	2,5	3,6	3,6	6,2	59,2	3,8	9	1	52	16	2	0	35
	Controle	6,1	2	41	4	2,4	0,8	2,9	3,4	3,4	6,3	53,5	3,9	10	1	45	9	3	0	34
134 ⁵	MAP/KCl	6,9	3	59	3	3,7	0,7	2,0	4,6	4,6	6,6	69,2	-	9	1	29	15	1	0	26
	Fosforito/KCl	6,9	7	53	1	3,8	1,4	1,7	5,3	5,3	7,0	76,1	-	6	2	45	12	1	0	16
	Fosforito/zinnwaldita	6,3	4	50	1	2,5	1,1	2,4	3,7	3,7	6,0	60,9	-	6	1	45	7	1	0	33
	Fosforito/anfibolito	6,4	10	99	1	3,0	1,3	2,2	4,6	4,6	6,8	66,8	-	7	1	38	14	2	0	11
	Fosforito/micaxisto	6,4	6	80	1	2,6	1,2	2,1	4,0	4,0	6,1	65,6	-	6	1	50	18	2	0	34
	Fosforito/fonolito	6,3	7	94	61	2,2	0,9	2,2	3,3	3,3	5,4	60,2	-	6	1	43	11	3	0	48
	Controle	6,0	2	48	2	2,1	0,8	2,3	3,0	3,1	5,3	56,0	-	7	1	47	8	3	0	52

¹DAE - dias após emergência da soja no campo. ²Fósforo e potássio extraídos por Mehlich-1. ³MO - matéria orgânica. ⁴Boro extraído por água quente. ⁵O valor de 134 DAE é apenas uma referência temporal, já que a soja foi colhida 103 dias após a emergência. Equivale a 30 dias após a colheita da soja

A disponibilidade de K nas áreas adubadas com anfíbolito, micaxisto e fonolito se destacaram tanto aos 56 DAE como após a colheita da soja, cerca de 400 dias após a aplicação dos tratamentos, com disponibilidades média e adequada de K, respectivamente, segundo a classificação de Alvarez et al. (1999). Nestas áreas, a superioridade desses tratamentos em relação à área adubada com MAP/KCl foi, em média, de 40%, aos 56 DAE e de 50%, aos 400 dias após a rochagem, aproximadamente. A maior disponibilidade de K após a colheita se deve à sua rápida liberação dos restos culturais. O K na matéria orgânica, apesar de presente em pequenas quantidades, é facilmente lavado logo após a morte das plantas, pois não faz parte de nenhuma estrutura ou fração orgânica (ERNANI; ALMEIDA; SANTOS, 2007). Merece ser destacado que o tratamento fosforito/fonolito foi o único que manteve a disponibilidade de K no solo acima do nível crítico da primeira até a última amostragem, de acordo com Alvarez et al. (1999), enquanto o solo tratado com MAP/KCl apresentou teor de K no solo acima do nível crítico apenas na primeira amostragem, feita aos 5 DAE do girassol (item 4.1.1).

O estudo de Machado et al. (2005 citados por MARTINS et al., 2008) relata o uso das rochas brecha vulcânica alcalina, biotita-flogopita xisto e ultramáfica alcalina como fontes de K para as culturas da soja e do milho em sucessão, sob condições de casa de vegetação. Os resultados evidenciaram que a aplicação de tais rochas, simplesmente moídas, contribuiu de forma significativa para o fornecimento de potássio às plantas já no primeiro cultivo, permanecendo ainda considerável concentração do nutriente para o cultivo subsequente (efeito residual). Além disso, a rocha ultramáfica alcalina forneceu também Ca e Mg e reduziu a acidez do solo, demonstrando o efeito multinutrientes e o papel como corretivo do solo. O potássio apresenta elevada mobilidade no solo e, em condições de alta disponibilidade, pode ser facilmente perdido por lixiviação ou absorvido em quantidades excessivas, o que caracterizaria o consumo de luxo

(FAQUIN, 2005). A maior concentração de K no fonolito (8,6%) e seu efeito residual devido à disponibilização mais gradual são responsáveis por este fornecimento de potássio no solo, mesmo após cerca de 400 dias da aplicação da rocha.

Moreira et al. (2006), ao pesquisarem o efeito residual das rochas brecha alcalina, arenito vulcânico, carbonatito, biotita xisto e ultramáfica alcalina sobre a soja após um primeiro cultivo de girassol em vasos, fizeram um importante comentário que auxilia a interpretação dos resultados. Os autores recomendaram a aplicação de reposição do K, por ocasião do plantio de outra cultura, devido à alta solubilidade do KCl e à grande exigência do girassol no primeiro cultivo. Mesmo em experimento em vasos, onde não há lixiviação do nutriente, a disponibilidade residual de K ficou bem abaixo dos níveis considerados adequados. No presente estudo a campo, a exportação de K com a colheita do girassol foi maior justamente no tratamento MAP/KCl, como se verifica na Tabela 9. Isso implica em uma menor concentração do nutriente no solo para um cultivo subsequente, ou seja, baixo efeito residual.

Na última amostragem do solo, tomada 30 dias após a colheita da soja (equivalente a 134 DAE ou cerca de 400 dias após a rochagem), ainda foi possível perceber o efeito residual dos tratamentos com rochagem no solo, principalmente pelas maiores concentrações dos nutrientes P, K, Ca, Mg, Cu e S. Destacaram-se, novamente, os tratamentos fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito, com boa disponibilidade de K e V% adequada (Tabela 10). Verificou-se também uma maior disponibilidade de Zn no solo adubado com fosforito (exceto fosforito/zinnwaldita) em relação às áreas adubadas com MAP/KCl e ao controle. No solo tratado com fosforito/zinnwaldita havia níveis médios de P, K, Zn e V% e bons de Ca, Mg, Mn, S e SB.

As concentrações de Mg das áreas adubadas com fosforito/anfibolito e fosforito/micaxisto foram ligeiramente superiores à concentração no tratamento referência, tanto aos 56 DAE como após a colheita da soja. Estes maiores teores disponíveis foram constantes desde a amostragem aos 112 DAE do girassol até a amostragem após a colheita da soja. Com uma maior concentração nas rochas anfibolito e micaxisto, com 7,1% e 8,1% de MgO, respectivamente (Tabela 1), presume-se que a composição multinutriente destas rochas leva a uma maior disponibilidade e efeito residual de Mg no solo.

A concentração de Na no solo tratado com fonolito continuou bastante superior às demais, até a última amostragem. Durante o cultivo da soja, as concentrações de Na foram expressivamente inferiores a aquela observada aos 112 DAE do girassol devido ao fato de o sódio ser facilmente lixiviado no solo. Nas condições edafoclimáticas do presente estudo, com bom volume de chuvas ao longo do ano, há a tendência de redução das concentrações observadas. No entanto, o risco de problemas relacionados à salinidade, causados pelas concentrações de Na detectadas no fonolito, não deve ser ignorado, principalmente sob condições climáticas de maior predisposição ao problema (baixo volume de chuvas).

4.2.2 Nutrição mineral da soja

4.2.2.1 Estado nutricional da soja

Ao avaliar as folhas diagnósticas da soja colhidas no florescimento, constatou-se que apenas os teores foliares de N e K não apresentaram efeitos significativos da aplicação dos tratamentos (Tabela 11). Os nutrientes N, K, Mg e S mostraram-se ligeiramente abaixo dos valores ideais, em todos os tratamentos. A avaliação dos teores de nutrientes nas folhas da soja mostrou que

as plantas de soja apresentaram estado nutricional mais adequado que as plantas de girassol no cultivo anterior, baseado nos níveis críticos ou faixas de suficiência de cada cultura, conforme Castro e Oliveira (2005) e Martinez, Carvalho e Souza (1999).

Os teores P nas folhas das áreas adubadas com fosforito foram inferiores aos teores foliares das áreas adubadas com MAP (Tabela 11), assim como ocorreu no primeiro cultivo com girassol, mostrando que há forte interação de P com o solo. Esta interação indesejável é maior à medida que se aumenta o teor de argila do solo, conforme descrito por Novais e Smith (1999). Nota-se, novamente, que os resultados da análise do P no solo das áreas que receberam o fosforito sofreram interferência do extrator Mehlich-1, o mais utilizado nas rotinas dos laboratórios de análise de solo, isso porque fosfatos naturais de baixa solubilidade são solubilizados pela solução ácida do extrator, levando a valores superestimados de P no solo (SCHLINDWEIN; GIANELLO, 2008).

O teor foliar de K foi maior nas áreas tratadas com MAP/KCl, fosforito/zinnwaldita, fosforito/anfibolito e fosforito/micaxisto, como se observa na Tabela 11. Embora não faça parte de nenhum composto orgânico nas plantas, o potássio é de grande importância para a qualidade e o teor de óleo das sementes de soja, favorece a retenção das vagens durante o período de formação, além de outros benefícios, como aumentar a resistência a ataques de fungos. A rochagem com fosforito/zinnwaldita, fosforito/anfibolito e fosforito/micaxisto permitiu, portanto, uma redução de parte da adubação com KCl, sem que isso afetasse o teor de K nas folhas.

Tabela 11 Teores foliares no estágio do florescimento da soja, sob diferentes tratamentos com rochagem

	Tratamentos							Referência ¹
	MAP/ KCl	Fosforito/ KCl	Fosforito/ zinnwaldita	Fosforito/ anfíbolito	Fosforito/ micaxisto	Fosforito/ fonolito	Controle	
g kg ⁻¹								
N	47,7 a	44,0 a	42,8 a	44,8 a	43,2 a	43,0 a	40,7 a	45,0
P**	3,2 a	2,6 c	2,8 c	3,0 b	2,9 b	2,7 c	2,7 c	2,5
K**	14,6 a	13,3 b	13,9 a	13,6 a	14,1 a	13,0 b	12,6 b	17,0
Ca**	14,9 a	13,3 b	13,3 b	13,1 b	13,3 b	12,7 b	12,7 b	10,0
Mg**	3,6 a	3,3 b	3,3 b	3,4 b	3,2 c	3,0 c	3,1 c	4,0
S**	2,4 a	2,2 a	2,2 a	2,2 a	2,1 a	1,7 b	1,8 b	2,5
mg kg ⁻¹								
B**	47,5 a	50,0 a	45,3 a	41,0 b	40,5 b	41,3 b	41,1 b	20,0
Cu*	15,7 a	14,8 a	16,7 a	15,6 a	15,7 a	12,5 b	15,0 a	10,0
Fe**	132,8 a	117,1 a	92,2 b	114,0 a	92,2 b	78,6 b	102,8 b	50,0
Mn*	69,6 a	73,1 a	79,2 a	67,0 a	61,4 b	51,7 b	61,2 b	20,0
Zn*	40,0 a	40,0 a	42,0 a	45,0 a	42,0 a	33,0 b	40,8 a	20,0

¹Nível crítico de nutrientes nas folhas de soja, adaptado de Martinez, Carvalho e Souza (1999). *Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. **Significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F. Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si, segundo o teste de Scott-Knott (p<0,05)

4.2.2.2 Matéria seca da parte aérea e produtividade da soja

A produção de matéria seca da parte aérea da soja no período do florescimento não foi influenciada pelos tratamentos, como se observa na Tabela 12. Na colheita, as menores produções de MSPA de soja foram observadas nos tratamentos fosforito/KCl (2.964 kg ha^{-1}) e fosforito/zinnwaldita (3.154 kg ha^{-1}) e a MSPA dos tratamentos fosforito/fonolito (3.665 kg ha^{-1}), fosforito/micaxisto (3.543 kg ha^{-1}), fosforito/anfibolito (3.425 kg ha^{-1}) e MAP/KCl (3.347 kg ha^{-1}) não diferiram do controle (3.445 kg ha^{-1}).

No caso dos resultados do tratamento fosforito/KCl não houve sincronização na liberação dos nutrientes das fontes deste tratamento. Enquanto houve uma pronta liberação do K presente no KCl, o P proveniente do fosforito teve disponibilização bem mais lenta e agravada ainda pela imobilização do P no solo argiloso em que foi aplicado.

Tabela 12 Valores médios referentes à produção de biomassa e produtividade de grãos da soja sob diferentes tratamentos com rochagem

Tratamento	MSPA _{flor}	MSPA _{colh} ¹	Produtividade
	(kg ha ⁻¹)		
MAP/KCl	1800 a	3347 a	1556 b
Fosforito/KCl	1692 a	2964 b	1537 b
Fosforito/zinnwaldita	1940 a	3154 b	1727 a
Fosforito/anfibolito	2212 a	3425 a	1850 a
Fosforito/micaxisto	2251 a	3543 a	1829 a
Fosforito/fonolito	2015 a	3665 a	1969 a
Controle	1815 a	3445 a	1813 a

¹Parte aérea da soja na ocasião da colheita composta por haste, vagens e grãos. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$)

Os tratamentos proporcionaram diferenças significativas na produtividade da soja. Os maiores valores foram observados nas áreas adubadas com fosforito/fonolito (1.969 kg ha^{-1}), fosforito/anfibolito (1.850 kg ha^{-1}), fosforito/micaxisto (1.829 kg ha^{-1}) e fosforito/zinnwaldita (1.727 kg ha^{-1}), iguais à produtividade do controle (1813 kg ha^{-1}) e superiores às produtividades obtidas nos tratamentos MAP/KCl (1.556 kg ha^{-1}) e fosforito/KCl (1.537 kg ha^{-1}), como se verifica na Tabela 12.

A produtividade da soja, alcançada com a adubação de fosforito/zinnwaldita, foi igual à alcançada no tratamento controle e superior à obtida no tratamento MAP/KCl. Cabe lembrar que o tratamento fosforito/zinnwaldita proporcionou menores produtividades no primeiro cultivo (girassol). No entanto, no segundo cultivo apresentou produtividade semelhante aos melhores tratamentos (Tabela 12). Isso indica que a zinnwaldita necessita de um tempo maior para reagir no solo do que anfibolito, micaxisto e fonolito, o que está de acordo com a estabilidade dos minerais e rochas ao intemperismo. A zinnwaldita é um tipo de mica lítio-fluo-ferrífera mais resistente ao intemperismo que anfibolito, micaxisto e fonolito, exemplificado por meio da Figura 1. O fonolito se destacou na produtividade dos dois cultivos, o que se justifica pelo maior teor de K_2O total (8,6%), dentre os agrominerais estudados (Tabela 1).

No tratamento MAP/KCl, fontes solúveis de P e K, houve uma rápida disponibilização dos nutrientes, o que permitiu a maior produtividade no cultivo do girassol, porém, com um maior esgotamento dos nutrientes do solo e menor efeito residual para o cultivo subsequente da soja. A alta solubilidade do KCl e a baixa capacidade de retenção de cátions no solo possibilitam que o K da solução do solo seja transportado para fora da zona de absorção radicular, caso não seja absorvido. No caso do P, a forte interação com os colóides inorgânicos pode torná-lo indisponível às culturas (MELAMED, 2009). Segundo Novais e Smyth

(1999), as fontes de P prontamente solúveis são as mais afetadas pelo fenômeno da fixação.

De modo geral, a substituição de todo o MAP por fosforito nos tratamentos com rochagem proporcionou maior produtividade de soja, atestando sua eficiência como fonte de P com maior efeito residual do que a fonte solúvel. Outros estudos também têm demonstrado que a produtividade da soja adubada com rochas fosfáticas pode ser superior às produtividades obtidas com uso de fontes solúveis, como demonstraram Paçô e Oliveira (2010), que compararam a produtividade de soja usando como fontes de P o superfosfato simples e o fosfato de rocha Itafós, com cerca de 8% de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico. Os resultados mostraram superioridade de 25%, aproximadamente, na produtividade da soja adubada com a rocha fosfática e ainda um maior equilíbrio nutricional das plantas. Resultados como estes indicam que a rocha fosforito pode ser uma opção viável para o manejo da adubação fosfatada para a cultura da soja.

As produtividades da soja (Tabela 12) foram mais baixas que 2.500 a 3.000 kg ha⁻¹, faixa de produtividade esperada para o estado de MG, conforme Novais (1999). A princípio, se esperava um baixo desempenho produtivo do tratamento controle, o que não foi verificado. Fisiologicamente, a soja é tida como uma cultura robusta e tende a apresentar menores variações na resposta produtiva a tratamentos contrastantes de adubação fosfática e potássica (SCHLINDWEIN; BORTOLON; GIANELLO, 2011; SCHLINDWEIN; GIANELLO, 2008). Além disso, trata-se de uma cultura recentemente introduzida na região sul de Minas Gerais, para a qual ainda não se têm recomendações regionais.

4.2.2.3 Acúmulo de nutrientes na parte aérea da soja na época da colheita

O conteúdo de nutrientes acumulados na parte aérea da soja (haste, vagens e grãos) colhida foi influenciado pelos tratamentos aplicados, exceto para as quantidades de Mn (Tabela 13). Observou-se que os tratamentos fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito levaram a maiores acúmulos de N, K, S, Cu e Zn e acúmulos semelhantes de P, Ca, Mg, B e Mn, comparativamente ao tratamento MAP/KCl. Como a produção de massa seca de parte aérea da soja foi estatisticamente igual entre estes tratamentos, como se observa na Tabela 12, a diferenciação quanto ao acúmulo dos nutrientes referidos se deve aos maiores teores dos mesmos nas plantas.

A complementação com a rochagem, portanto, apesar de não ser fonte de alguns dos nutrientes citados, contribuiu para uma melhor nutrição das plantas de soja, seja pelo seu maior efeito residual, seja pelo efeito multinutrientes, devido à composição variada dos agrominerais, seja por uma condição mais equilibrada e favorável aos microrganismos fixadores de N.

4.2.2.4 Acúmulo de nutrientes nos grãos de soja

Os tratamentos aplicados proporcionaram diferenças no acúmulo de todos os nutrientes nos grãos de soja na ocasião da colheita, mostrando diferenças significativas, como se observa na Tabela 14. O acúmulo de nutrientes nos grãos de soja colhidos apresentou a mesma tendência observada na parte aérea da soja, com destaque para os tratamentos fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito, com acúmulos superiores de N, K, Ca, Mg, S, Cu, Mn e Zn e acúmulos equivalentes de P e B, quando comparados ao tratamento MAP/KCl.

Tabela 13 Acúmulo de nutrientes na parte aérea da soja (haste, vagens e grãos), na época da colheita, sob diferentes tratamentos com rochagem

	Tratamentos						
	MAP/ KCl	Fosforito/ KCl	Fosforito/ zinnwaldita	Fosforito/ anfíbolito	Fosforito/ micaxisto	Fosforito/ fonolito	Controle
	kg ha ⁻¹						
N**	115,1 b	107,5 b	122,8 a	129,2 a	130,3 a	140,7 a	126,2 a
P*	13,9 a	9,4 b	11,2 b	13,1 a	12,7 a	11,9 a	9,7 b
K**	82,1 b	79,8 b	110,5 a	132,7 a	128,0 a	123,6 a	74,3 b
Ca*	24,2 a	20,0 b	19,5 b	23,1 a	25,5 a	24,3 a	22,9 a
Mg*	14,0 a	11,2 b	12,1 b	14,4 a	14,7 a	13,5 a	13,4 a
S**	4,4 c	4,5 c	5,2 b	6,4 a	6,5 a	6,1 a	5,5 b
	g ha ⁻¹						
B**	91,7 a	69,1 b	80,5 a	82,3 a	85,3 a	92,1 a	82,8 a
Cu*	40,8 b	35,7 b	39,9 b	45,6 a	45,7 a	46,3 a	40,6 b
Fe*	1363,7 a	917,7 b	1091,2 a	856,6 b	927,4 b	851,5 b	632,8 b
Mn	68,0 a	61,9 a	65,6 a	71,8 a	69,3 a	70,5 a	56,8 a
Zn**	83,1 b	87,5 b	88,0 b	99,9 a	104,5 a	101,9 a	87,1 b

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. **Significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F. Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si, segundo o teste de Scott-Knott (p<0,05)

Tabela 14 Acúmulo de nutrientes nos grãos de soja sob diferentes tratamentos com rochagem

	Tratamentos						
	MAP/ KCl	Fosforito/ KCl	Fosforito/ zinnwaldita	Fosforito/ anfíbólito	Fosforito/ micaxisto	Fosforito fonólito	Controle
	kg ha ⁻¹						
N**	96,2 b	94,8 b	109,4 a	113,8 a	113,8 a	124,0 a	111,1 a
P*	7,7 a	6,5 b	7,7 a	8,9 a	8,4 a	8,1 a	6,8 b
K*	19,3 b	18,6 b	21,0 b	24,8 a	25,4 a	23,8 a	24,4 a
Ca*	4,6 b	4,5 b	4,9 b	5,5 a	5,3 a	5,3 a	5,1 a
Mg**	3,4 b	3,3 b	3,8 a	4,2 a	3,9 a	4,1 a	3,7 a
S**	3,4 b	3,8 b	4,3 b	5,2 a	5,4 a	4,9 a	4,5 b
	g ha ⁻¹						
B*	44,0 a	36,7 b	45,9 a	45,6 a	43,7 a	47,4 a	40,2 b
Cu*	25,3 b	24,9 b	27,9 b	31,8 a	30,4 a	31,7 a	27,6 b
Fe*	196,0 b	163,4 b	173,0 b	173,0 b	179,2 b	228,3 b	313,2 a
Mn*	25,2 b	27,7 b	29,5 b	32,8 a	31,3 a	31,8 a	28,4 b
Zn**	60,2 b	68,4 b	68,7 b	78,4 a	79,3 a	78,5 a	67,7 b

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. **Significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F. Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si, segundo o teste de Scott-Knott (p<0,05)

Para fins de comparação, os maiores acúmulos de nutrientes nos grãos de girassol foram obtidos nos tratamentos MAP/KCl, fosforito/anfibolito e fosforito/micaxisto, com valores praticamente iguais para todos os nutrientes analisados (Tabela 9). Na análise dos valores acumulados nos grãos dos dois cultivos (Tabela 9 e Tabela 14) fica mais claro o efeito imediato das fontes solúveis convencionais de nutrientes, quando aplicadas isoladamente e o efeito mais gradual, quando complementado com a rochagem de fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito, reforçando o maior efeito residual desses tratamentos. Resende et al. (2006a) apresentaram resultados de agrominerais fontes de K em casa de vegetação, comprovando o maior efeito residual dos agrominerais.

4.3 Avaliação econômica por meio da simulação de custos dos agrominerais

Na avaliação econômica estabelecida (Tabela 15) foi observado que os custos dos tratamentos fosforito/zinnwaldita, fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito (insumos e aplicação apenas) foram, em geral, 20% maiores que o custo do tratamento MAP/KCl, baseado nos preços dos agrominerais e na distância estabelecidos hipoteticamente (R\$ 90,00 por tonelada das rochas colocadas na fazenda, num frete de 300 km). O custo total destes tratamentos foi 4% superior ao total gasto na área tratada com MAP/KCl. Uma consideração importante é que zinnwaldita, anfibolito e micaxisto são classificados ainda como passivos ambientais de atividades de mineração e certamente tiveram seus custos superestimados por este raciocínio.

As receitas obtidas na área tratada com MAP/KCl, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito foram equivalentes e ligeiramente superiores na área tratada com fosforito/anfibolito (Tabela 15). Com as maiores produtividades de soja nas áreas com fosforito/zinnwaldita, fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e

fosforito fonolito (Tabela 12), porém, com resultados econômicos equivalentes, nota-se que os agrominerais são eficientes no aspecto agrônomo devido ao efeito residual destes, mas não lucrativos, neste primeiro ano de cultivo. Apesar da tecnologia de produção e manejo adotados, buscando-se altas produtividades das culturas, principalmente da soja, este fato não foi observado, inclusive no tratamento MAP/KCl, uma vez que as produtividades obtidas foram aquém do esperado (Tabela 12). Este aspecto certamente influenciou sobremaneira os resultados econômicos, uma vez que, especificamente no caso da soja, adotando-se manejo semelhante, têm sido obtidas produtividades de cerca de 3.000 kg ha⁻¹ na região.

Tabela 15 Análise econômica simplificada referente aos cultivos de girassol e soja sob diferentes tratamentos com rochagem

Tratamento	Custos			Receita	Saldo
	Tratamentos ¹	Lavouras ²	Total		
	-----US\$ ha ⁻¹ -----				
MAP/KCl	434,23	1.531,05	1.965,27	1.367,69	-597,58
Fosforito/KCl	267,07	1.531,05	1.798,12	957,16	-840,96
Fosforito/zinnwaldita	519,39	1.531,05	2.050,43	1.210,43	-840,00
Fosforito/anfibolito	519,39	1.531,05	2.050,43	1.419,45	-630,98
Fosforito/micaxisto	519,39	1.531,05	2.050,43	1.369,19	-681,25
Fosforito/fonolito	519,39	1.531,05	2.050,43	1.352,31	-698,13
Controle	0,00	1.531,05	1.531,05	1.193,79	-337,25

¹Custo referente aos insumos de cada tratamento e suas aplicações. ²Custo referente aos insumos e operações durante as fases de implantação, manutenção e colheita dos cultivos de girassol e soja. Nota: cotação média do dólar comercial de fevereiro de 2011 de R\$1,67 (Fonte: DÓLAR HOJE, 2012)

Nos cultivos de girassol e soja (safrinha de 2010 e safra 2010/2011), nenhum dos tratamentos proporcionou lucro (Tabela 15). Em uma área de abertura, quimicamente degradada antes do cultivo do girassol, o período de um ano, em geral, é insuficiente para atingir os níveis adequados de fertilidade para

maiores produtividades. Conforme alertaram HINSINGER, BOLLAND e GILKES (1996), períodos curtos de avaliação tendem a resultados negativos da técnica da rochagem, cujos efeitos devem ser avaliados a médio e longo prazos. Dentre os tratamentos com rochagem, o tratamento fosforito/anfibolito foi economicamente mais interessante, seguido de fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito.

É preciso levar em conta, ainda, que a rochagem, no presente caso, foi utilizada como uma prática corretiva para o manejo da fertilidade. Portanto, trata-se de uma modalidade de investimento, o qual deve ser amortizado em mais longo prazo, assim como ocorre para a calagem ou para a fosfatagem corretiva. Este fato não foi considerado no presente trabalho, uma vez que o custo do investimento foi integralmente computado no primeiro ano, de acordo com a metodologia de análise econômica adotada.

5 CONCLUSÃO

Numa estratégia de manejo com baixo investimento em fertilizantes é possível substituir parcialmente as fontes solúveis convencionais por agrominerais aplicados como rochagem, mantendo-se produtividades equiparáveis às obtidas com o uso exclusivo de fontes convencionais.

Os tratamentos fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito foram as melhores combinações para a produção de girassol, apresentando efeito residual de nutrientes para o cultivo subsequente da soja.

As rochas fosforito de Campos Belos, GO; anfibolito de Nazareno, MG; micaxisto de Brasília, DF e fonolito de Poços de Caldas, MG constituem boas alternativas para a substituição parcial de fontes convencionais de nutrientes, segundo uma estratégia de menor uso de fertilizantes de alta solubilidade.

REFERÊNCIAS

- AGRITEMPO. **Sistema de monitoramento agrometeorológico**. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br/agroclima/pesquisaWeb>>. Acesso em: 12 fev. 2012.
- ALVAREZ, V. H. et al. Interpretação dos resultados de análises de solo. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: UFV, 1999. p. 25-32.
- ANDRADE, L. R. M.; MARTINS, E. S.; MENDES, I. C. **Avaliação de uma rocha ígnea como corretivo de acidez e disponibilização de nutrientes para as plantas**. Planaltina: EMBRAPA, 2002. 19 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 57).
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2008**. São Paulo, 2009. 160 p.
- BACKES, R. et al. Desempenho de cultivares de girassol em duas épocas de plantio de safrinha no planalto norte catarinense. **Scientia Agraria**, Piracicaba, v. 9, n. 1, p. 41-48, 2008.
- BAKKEN, A. et al. Crushed rocks and mine tailings applied as K fertilizers on grassland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 56, n. 1, p. 53-57, Mar. 2000.
- BASAK, B. B.; BISWAS, D. R. Influence of potassium solubilizing microorganism (*Bacillus mucilaginosus*) and waste mica on potassium uptake dynamics by sudan grass (*Sorghum vulgare* Pers.) grown under two Alfisols. **Plant and Soil**, The Hague, v. 317, n. 1/2, p. 235-255, 2008.
- BISSANI, C. A. et al. **Fertilidade do solo e manejo da adubação das culturas**. Porto Alegre: Gênese, 2004. 328 p.
- BISWAS, D. R. Nutrient recycling potential of rock phosphate and waste mica enriched compost on crop productivity and changes in soil fertility under potato-soybean cropping sequence in an Inceptisol of Indo-Gangetic Plains of India. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 89, n. 1, p. 15-30, Jan. 2010.

BOARETTO, A. E. et al. Amostragem, acondicionamento e preparo de amostras de plantas para análise química. In: SILVA, F. C. (Org.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: EMBRAPA Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2009. p. 59-85.

BOLLAND, M.; BAKER, M. J. Powdered granite is not an effective fertilizer for clover and wheat in sandy soils from Western Australia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 56, n. 1, p. 59-68, Mar. 2000.

BORKERT, C. M. et al. **Seja o doutor da sua soja**. Piracicaba: POTAFOS, 1994. 17 p. (Informações Agronômicas, 66. Arquivo do Agrônomo, 5).

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos**. Brasília, 2007. 141 p.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Agrário. Instrução Normativa nº 1, de 19 de fevereiro de 2009. Dispõe sobre os critérios e procedimentos relativos à concessão, manutenção e uso do selo combustível social. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, n. 37, p. 71-73, 25 fev. 2009. Seção 1.

_____. **Programa nacional de produção e uso de biodiesel: inclusão social e desenvolvimento territorial**. Brasília, 2012. 48 p. Disponível em: <<http://www.mda.gov.br/biodiesel>>. Acesso em: 10 abr. 2012.

CAMPBELL, N. S. **The use of rockdust and composted materials as soil fertility amendments**. 2009. 402 p. Thesis (Ph.D. in Philosophy) - University of Glasgow, Glasgow, 2009.

CASTRO, C. et al. Rochas brasileiras como fonte alternativa de potássio para a cultura do girassol. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 9, n. 2, p. 179-190, 2006.

CASTRO, C.; FARIAS, J. R. B. Fisiologia do girassol. In: LEITE, R. M. V. B. C.; BRIGHENTI, A. M.; CASTRO, C. (Ed.). **Girassol no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2005. p. 163-218.

CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A. Nutrição e adubação do girassol. In: LEITE, R. M. V. B. C.; BRIGHENTI, A. M.; CASTRO, C. (Ed.). **Girassol no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2005. p. 317-373.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **PIB do agronegócio brasileiro no PIB do Brasil: 1994 a 2010**. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/pib/>>. Acesso em: 5 fev. 2012.

COELHO, A. M. O potássio na cultura do milho. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p. 613-658.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG, 1999. 359 p.

CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 1., 2010, Brasília. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Cerrados, 2010. 322 p.

CORONEOS, C.; HINSINGER, P.; GILKES, R. J. Granite powder as a source of potassium for plants: a glasshouse bioassay comparing two pasture species. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 45, n. 2, p. 143-152, June 1996.

CORTES, G. P. et al. Fonolito como substituto do cloreto de potássio e/ou outras fontes de potássio na agricultura e pecuária no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 1., 2010, Brasília. **Anais...** Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2010. p. 75-83.

CRUSCIOL, C. A. C. **Eficiência de rocha fonolito (F2) como fonte de potássio para as culturas do arroz, feijão, milho e soja**: laudo técnico de eficiência e praticabilidade agrônômica. Botucatu, 2008. 30 p.

DALCIN, G. **Seleção de microrganismos promotores da disponibilidade de nutrientes contidos em rochas, produtos e rejeitos de mineração**. 2008. 101 p. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

DÓLAR HOJE. **Dólar**: cotação fevereiro 2011. Disponível em: <<http://www.dolarhoje.org/2011/02/dolar-cotacao-fevereiro-2011.html>>. Acesso em: 12 fev. 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Tecnologias de produção de soja**: região central do Brasil 2012 e 2013. Londrina, 2011. 261 p. (EMBRAPA Soja. Sistemas de Produção, 15).

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 552-594.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 183 p.

FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.

FYFE, W. S.; LEONARDOS, O. H.; THEODORO, S. H. Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 78, n. 4, p. 715-720, 2006.

HARLEY, A.; GILKES, R. J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 56, n. 1, p. 11-36, Mar. 2000.

HINSINGER, P.; BOLLAND, M. D. A.; GILKES, R. J. Silicate rock powder: effect on selected chemical properties of a range of soils from Western Australia and on plant growth as assessed in a glasshouse experiment. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 45, n. 1, p. 69-79, 1996.

HINSINGER, P. et al. Plant-induced weathering of a basaltic rock: experimental evidence. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, London, v. 65, n. 1, p. 137-152, 2001.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 12 fev. 2012.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo: conceitos básicos**. Viçosa, MG: SBCS, 2009. v. 1, p. 333-379.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V. Prefácio. In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. (Ed.). **Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: CETEM/Petrobrás, 2009. p. 13-20.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V.; MELAMED, R. O fósforo na agroindústria brasileira. In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. (Ed.). **Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: CETEM/Petrobrás, 2009. p. 257-304.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V.; NASCIMENTO, M. Importância e função dos fertilizantes numa agricultura sustentável e competitiva. In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. (Ed.). **Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: CETEM/Petrobrás, 2009. p. 81-132.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V.; RIBEIRO, R. C. C. Fertilização natural: rochagem, agricultura orgânica e plantio direto: breve síntese conceitual. In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. (Ed.). **Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: CETEM/Petrobrás, 2009. p. 149-172.

LEONARDOS, O. H.; THEODORO, S. H.; ASSAD, M. L. Remineralization for sustainable agriculture: a tropical perspective from a Brazilian viewpoint. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 56, n. 1, p. 3-9, Mar. 2000.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 456 p.

LIMA, M. H. M. R.; TEIXEIRA, N. D. S. Um estudo das principais lavouras para a produção de biocombustíveis. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B. da; CASTILHOS, Z. C. (Ed.). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 169-187.

LOPES-ASSAD, M. L. et al. Solubilização de pó-de-rocha por *Aspergillus niger*. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 9, n. 1, p. 1-17, 2006.

_____. The solubilization of potassium-bearing rock powder by *Aspergillus niger* in small-scale batch fermentations. **Canadian Journal Microbiology**, Ottawa, v. 56, p. 598-605, July 2010.

LUZ, A. B. et al. Rochas, minerais e rotas tecnológicas para produção de fertilizantes alternativos. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B. da; CASTILHOS, Z. C. (Ed.). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 61-88.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafós, 1997. 319 p.

MARQUES, J. J. et al. Major element geochemistry and geomorphological relationship in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 119, n. 3/4, p. 179-195, Apr. 2004.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic, 1995. 889 p.

MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: UFV, 1999. p. 143-168.

MARTINS, E. S. **Uso potencial de rochas regionais como fontes de nutrientes e condicionador do solo**. Jataí: EMBRAPA Cerrados, 2010. Disponível em: <<http://www.redeaplmineral.org.br/biblioteca/eventos/1b0-seminario-apl-do-sudoeste-goiano/08%20-%20Palestra%20Eder%20Martins.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2012.

MARTINS, E. S. et al. Agrominerais: rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. In: _____. **Rochas e minerais industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2008. p. 205-223.

MEERT, L. et al. Produtividade e rentabilidade da soja cultivada com fontes alternativas de nutrientes em Guarapuava, PR. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 3371-3374, 2009.

MELAMED, R. Implicações das interações físico-químicas no manejo de fertilizantes para sistemas de produção agrícola em solos tropicais. In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. (Ed.). **Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. p. 139-147.

MELAMED, R.; GASPAR, J.; MIEKELEY, N. **Pó-de-rocha como fertilizante alternativo para sistemas de produção sustentáveis em solos tropicais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2007. 24 p. (Série Estudos e Documentos. Versão Provisória, SED-72).

MELO, V. F.; CASTILHOS, R. M. V.; PINTO, L. F. S. Reserva mineral do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo: conceitos básicos**. Viçosa, MG: SBCS, 2009. v. 1, p. 251-332.

MONTEIRO, C. F. **Fosforitos do grupo Bambuí na região de Campos Belos (GO) / Arraias (TO), na borda oeste do cráton São Francisco**. 2009. 135 p. Dissertação (Mestrado em Prospecção e Geologia Econômica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

MOREIRA, A. et al. Efeito residual de rochas brasileiras como fertilizantes e corretivos da acidez do solo. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 9, n. 2, p. 163-177, 2006.

_____. Rocha ultramáfica alcalina como fonte potássica na produção e estado nutricional da centrosema. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 46., 2009, Maringá. **Anais...** Maringá: SBZ, 2009. p. 1-3.

MUNIZ, D. H. F. et al. Teores de metais no solo e absorção pelo milho decorrentes da utilização de rochas moídas como fontes de potássio. In: ENCONTRO DE JOVENS TALENTOS DA EMBRAPA CERRADOS, 3., 2007, Planaltina. **Resumos...** Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2007. p. 85.

NASCIMENTO, M.; LAPIDO-LOUREIRO, F. E. **Fertilizantes e sustentabilidade: o potássio na agricultura brasileira**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. 59 p. (Série Estudos e Documentos, 61).

NOVAIS, R. F. Sugestões de adubação para as diferentes culturas em Minas Gerais: soja. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: UFV, 1999. p. 323-324.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solos e plantas em condições tropicais**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 399 p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, 2007. p. 471-550.

OLIVEIRA, F. A. et al. Efeito residual da adubação com rochas brasileiras como fontes de potássio para a cultura da soja. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 9, n. 2, p. 247-262, 2006a.

_____. Eficiência da adubação residual com rochas brasileiras para a cultura da soja. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 9, n. 2, p. 231-246, 2006b.

PAÇÔ, I. B.; OLIVEIRA, S. A. Eficiência agrônômica de fosfato de rocha itafós, utilizados isoladamente ou associados ao superfosfato simples no oeste da Bahia, para a cultura da soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 1., 2010, Brasília. **Anais...** Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2010. p. 93-100.

PRIYONO, J.; GILKES, R. J. High-energy milling improves the effectiveness of silicate rock fertilizers: a glasshouse assessment. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, n. 3, p. 358-369, June 2008.

RAIJ, B. van et al. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico/Fundação IAC, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RESENDE, A. V. et al. Rochas como fontes de potássio e outros nutrientes para culturas anuais. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 9, n. 2, p. 135-161, 2006a.

_____. **Rochas moídas como fontes de potássio para o milho em solo de cerrado**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2006b. 20 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 162). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/CPAC-2009/27832/1/bolpd_162.pdf>. Acesso em: 26 set. 2010.

_____. Suprimento de potássio e pesquisa de uso de rochas “in natura” na agricultura brasileira. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 9, n. 1, p. 19-42, 2006c.

RIBEIRO, L. S. et al. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, n. 3, p. 891-897, maio/jun. 2010.

RODRIGUES, A. F. S. Agronegócio e mineral negócio: relações de dependência e sustentabilidade. In: _____. **Informe mineral: desenvolvimento e economia mineral**. Brasília: DNPM, 2009. p. 28-47.

SCHLINDWEIN, J. A.; BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de extração de potássio em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 35, n. 5, p. 1669-1678, set./out. 2011.

SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, n. 5, p. 2037-2049, set./out. 2008.

SFREDO, G. J.; CAMPOS, R. J.; SARRUGE, J. R. **Girassol nutrição e adubação**. Londrina: EMBRAPA-CNPS, 1984. 36 p. (Circular Técnica, 8).

SILVA, E. A. et al. Efeitos da rochagem e de resíduos orgânicos sobre aspectos químicos e microbiológicos de um subsolo exposto e sobre o crescimento de *Astronium fraxinifolium* Schott. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 323-333, mar./abr. 2008.

SILVA, F. C. (Org.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

SILVA, M. L. O. et al. Viabilidade técnica e econômica do cultivo de safrinha do girassol irrigado na região de Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 1, p. 200-205, jan./fev. 2007.

SMALBERGER, S. A. et al. Relative agronomic effectiveness of phosphate rock compared with triple superphosphate for initial canola, wheat, or ryegrass, and residual wheat in two acid soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 175, n. 1, p. 36-40, Jan. 2010.

SOUZA, F. N. S. et al. Potencial de rejeito mineral na produção de grãos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 1., 2010, Brasília. **Anais...** Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2010. p. 289-295.

SOUZA FILHO, L. F. S. et al. Eficiência de um flogopitito como fonte de potássio para o desenvolvimento inicial do mamoeiro. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 9, n. 2, p. 215-229, 2006.

STRAATEN, P. V. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 78, n. 4, p. 731-747, 2006.

THEODORO, S. H. et al. Experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 9, n. 2, p. 263-292, 2006.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 78, n. 4, p. 721-730, 2006.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H.; ALMEIDA, E. Mecanismos para disponibilização de nutrientes minerais a partir de processos biológicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 1., 2010, Brasília. **Anais...** Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2010. p. 173-181.

THEODORO, S. H.; ROCHA, E. L. Rochagem: equilíbrio do solo e vigor para as plantas. In: CONGRESSO BRASILEIRO E SEMINÁRIO ESTADUAL DE AGROECOLOGIA, 3., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: EPAGRI/UFSC, 2005. Disponível em: <http://www.agroecologiaemrede.org.br/upload/arquivos/P484_2005-11-30_134703_100.pdf>. Acesso em: 26 set. 2010.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A. J. Intemperismo e formação do solo. In: TEIXEIRA, A. et al. (Ed.). **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2001. p. 139-166.

UBIANA, C. S. et al. Biossolubilização de fonolito por microrganismos do solo solubilizadores de potássio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2011. 1 CD-ROM.

WALLANDER, H.; WICKMAN, T. Biotite and microcline as potassium sources in ectomycorrhizal and non-mycorrhizal *Pinus sylvestris* seedlings. **Mycorrhiza**, Berlin, v. 9, n. 1, p. 25-32, Feb. 1999.

WILPERT, K. V.; LUKES, M. Ecochemical effects of phonolite rock powder, dolomite and potassium sulfate in a spruce stand on an acidified glacial loam. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 65, n. 1, p. 115-127, Feb. 2003.

YOKOMIZO, E. O combustível do girassol. **Revista CREA**, Curitiba, v. 21, n. 1, p. 18-23, 2003.

APÊNDICES

Tabela 1A Quadrados médios da análise de variância das variáveis MSPA no florescimento e colheita, produtividade e acúmulo de P e K na planta e nos grãos, analisadas no cultivo do girassol

FV	GL	MSPA _{R7}	MSPA _{colh}	Produtiv.	Acúmulo de P		Acúmulo de K	
					PA ¹	Grãos	PA ¹	Grãos
Trat.	6	5577400**	1030384**	607746**	13,49**	12,14**	179,41**	24,43**
Bloco	2	2030207	854028	518648	15,02	13,06	70,69	16,31
Erro	33	1129680	180419	74986	2,14	1,84	25,30	2,97
CV(%)		14,58	13,55	19,62	24,34	28,91	12,33	20,50
Média (kg ha ⁻¹)		7291	3136	1396	6,02	4,69	40,78	8,40

¹PA: Parte aérea do girassol na ocasião da colheita, composta de caule, folhas, capítulo e aquênios. *Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. **Significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F

Tabela 1B Quadrados médios da análise de variância das variáveis MSPA, produtividade e acúmulo de P e K na planta e nos grãos, analisadas no cultivo da soja

FV	GL	MSPA _{flor}	MSPA _{colh}	Produtiv.	Acúmulo de P		Acúmulo de K	
					PA ¹	Grãos	PA ¹	Grãos
Trat.	6	270647,13	337242,02*	151505,23**	17,67*	4,63*	3779,84**	46,83*
Bloco	2	442420,83	313913,42	162123,06	20,75	7,32	422,67	39,94
Erro	33	166984,91	106301,35	31188,82	5,43	1,47	371,93	14,31
CV(%)		20,84	9,69	10,07	19,94	15,72	18,47	16,85
Média (kg ha ⁻¹)		1961	3363	1754	11,68	7,72	104,43	22,46

¹PA = Parte aérea da soja na ocasião da colheita, composta de caule, vagens e grãos. *Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. **Significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F

Tabela 1C Análise econômica referente aos cultivos de girassol e soja sob diferentes tratamentos com roçagem, para uma distância hipotética de 300 km entre o local de obtenção dos agrominerais e o local de aplicação

Tratamentos	CUSTOS				RECEITAS			SALDO
	Tratamentos aplicados ¹	Implantação, manutenção e colheita das lavouras ²			Girassol	Soja	TOTAL	
		Girassol	Soja	TOTAL				
-----R\$ ha ⁻¹ -----								
MAP/KCl	725,16	927,88	1.628,97	3.282,01	1.298,88	985,17	2.284,05	-997,96
Fosforito/KCl	446,01	927,88	1.628,97	3.002,86	624,96	973,50	1.598,46	-1404,40
Fosforito/zinnwaldita	867,38	927,88	1.628,97	3.424,23	927,36	1.094,07	2.021,43	-1402,80
Fosforito/anfibolito	867,38	927,88	1.628,97	3.424,23	1.198,80	1.171,69	2.370,49	-1053,74
Fosforito/micaxisto	867,38	927,88	1.628,97	3.424,23	1.128,24	1.158,30	2.286,54	-1137,68
Fosforito/fonolito	867,38	927,88	1.628,97	3.424,23	1.011,60	1.246,75	2.258,35	-1165,87
Controle	0,00	927,88	1.628,97	2.556,85	845,28	1.148,36	1.993,64	-563,21

¹Custo dos tratamentos, incluindo os insumos e suas aplicações. ²Custo referente às atividades de tratamento de sementes, plantio, controle de matocompetição, manejo de pragas e doenças, colheita, arrendamento e despesas administrativas