

SUPRIMENTO DE POTÁSSIO E PESQUISA DE USO DE ROCHAS “IN NATURA” NA AGRICULTURA BRASILEIRA

**Álvaro Vilela de Resende¹, Éder de Souza Martins¹, Claudinei
Gouveia de Oliveira², Mariana Coelho de Sena¹, Cynthia Torres
Toledo Machado¹, Daniel Ioshiteru Kinpara¹ &
Eduardo Cyrino de Oliveira Filho¹**

¹ Embrapa Cerrados.

Cx. Postal 08223, CEP 73.310-970, Planaltina – DF
{alvaro, eder, cynthia, kinpara, cyrino}@cpac.embrapa.

² Instituto de Geociências da Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil.

Recebido 12 de março de 2006; revisado 27 de maio; aceito 22 de junho

RESUMO – Conseqüência da baixa fertilidade natural dos solos, da elevada demanda de potássio (K) na agricultura e da reduzida reserva brasileira de minérios de K, a importação de fertilizantes potássicos tem representado grande ônus à balança comercial do País. Há cerca de 30 anos, tentativas de utilização de rochas como fontes locais de K não obtiveram sucesso devido à baixa solubilidade natural dos minerais constituintes ou ao elevado custo dos processos industriais de obtenção de fertilizantes a partir dessas fontes. Entretanto, nos últimos anos, outros tipos de rochas têm se mostrado promissoras no fornecimento de K, mesmo quando aplicadas “in natura”, simplesmente moídas. Isso motivou o estabelecimento de uma rede de pesquisa para estudar o potencial de utilização de tais rochas em âmbito nacional.

Palavras-Chave: rochagem, fonte de potássio, fertilizante alternativo, adubação.

ABSTRACT – The low natural fertility of soils, the high potassium (K) demand in agriculture, and the reduced Brazilian mineral reserves of K are the causes of the high importation of potassium fertilizers in Brazil. This represents a great and negative impact on Brazil’s trade balance. Forty years ago, trials for utilization of rocks as local K sources did not reach success due to the low natural solubility of minerals or the high cost of

industrial processes to obtain fertilizers from them. However, in the last years, other kinds of rocks are promising as K sources, even when applied in natura, just ground. Those findings led to the establishment of a research network to study the potential of using those rocks as K sources nationwide.

Keywords: remineralisation, potassium source, alternative fertilizer, fertilization.

INTRODUÇÃO

O território brasileiro é constituído, na sua maior parte, por solos ácidos e pobres em nutrientes como o potássio (K). Para torná-los produtivos, são utilizadas grandes quantidades de fertilizantes, que englobam cerca de 40 % dos custos variáveis de produção. Consequentemente, é necessário buscar alternativas econômicas aos fertilizantes tradicionais. O Brasil tem importado a maior parte do fertilizante potássico utilizado na agricultura, especialmente na forma de cloreto de potássio (KCl). Em 2003 foram produzidas 390,3 mil toneladas de K_2O , correspondendo a apenas 10% da demanda nacional. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), o balanço projetado entre a oferta e a demanda de cloreto de potássio no período 2001-2010, aponta um déficit a ser suprido via importação, da ordem de 39,23 milhões de toneladas, o que acarretará um dispêndio de divisas total para os próximos 10 anos de 8,77 bilhões de dólares. Essas projeções mostram um grande ônus para a balança comercial do País e exige uma ação coordenada para buscar fontes alternativas de K.

Resultados obtidos em pesquisas recentes indicam que rochas contendo quantidades razoáveis de flogopita ou biotita podem constituir fontes alternativas de K para uso agrícola. Alguns desses tipos de rochas com potencial de uso

agronômico são os kamafugitos, flogopititos, biotititos e kimberlitos, com distribuição ampla e variável em todo o território nacional. A prospecção, caracterização geoquímica, definição de métodos de processamento e avaliação agronômica sistemática dessas rochas poderá resultar na identificação de fontes alternativas eficientes do nutriente, dando origem a um novo grupo de insumos agrícolas.

Assim, uma rede interinstitucional de pesquisa foi estabelecida para desenvolver atividades de avaliação e experimentação diversificadas, com rochas de cada região geográfica, visando ampliar as possibilidades de uso e de viabilidade econômica desses materiais como fontes de K. Vislumbra-se o atendimento de parte significativa da demanda pelo nutriente em sistemas convencionais e orgânicos de produção agropecuária no Brasil, com impacto positivo na balança comercial, além de contribuir para maior sustentabilidade dos sistemas de produção.

Este artigo constitui-se de uma revisão bibliográfica na qual se busca descrever a problemática do suprimento de K na agropecuária brasileira e apresentar a estratégia de trabalho da rede nacional de pesquisa de rochas como fontes alternativas de potássio e outros nutrientes.

DEMANDA E PRODUÇÃO DE POTÁSSIO NO BRASIL

O agronegócio tem grande participação na economia brasileira, sendo responsável por 40% do produto interno bruto (PIB). O País vem apresentando um crescimento contínuo com relação à produção agrícola. Isso se deve, em parte, à melhor utilização de fertilizantes e à sua aplicação em maiores quantidades. Assim, além de se tornar um dos maiores produtores de alimentos no mundo, o

Brasil vem se tornando também um dos maiores consumidores de fertilizantes. Consta-se uma tendência de aumento do uso de KCl, diretamente relacionado com o crescimento da produção agropecuária no País. Em 1988, foi importado 1,3 milhão de toneladas de K_2O e em 2003 as importações atingiram 2,6 milhões de toneladas, representando um gasto de 586 milhões de dólares (Nascimento & Loureiro, 2004; Lopes, 2005).

Atualmente tem havido também maior preocupação com a conservação ambiental, com a sustentabilidade da exploração agrícola e com a qualidade dos alimentos produzidos. Assim, aumentou a adoção de sistemas de produção diferenciados, como a agricultura orgânica. Nesse sistema, existem restrições ao uso do cloreto de potássio devido à sua elevada solubilidade e liberação de grande quantidade de cloro.

Após o nitrogênio (N), o K é o nutriente requerido em maiores quantidades pelas culturas. Entretanto, diferentemente do N que pode ser disponibilizado por processos de fixação biológica, não existem fontes renováveis de K, de modo que sua disponibilidade às plantas depende essencialmente das reservas do solo e da aplicação de fertilizantes. Nas condições brasileiras, o problema agrava-se pelo fato de os solos serem pobres em minerais contendo K e apresentarem baixa capacidade de retenção de cátions, o que favorece a lixiviação do K oriundo dos fertilizantes para fora da zona de crescimento radicular (Vilela *et al.*, 2004; Curi *et al.*, 2005).

Devido à baixa reserva mineral de K nos solos e às perdas por lixiviação, é comum haver carência do nutriente quando o seu fornecimento na forma de fertilizante é insuficiente para atender à demanda das culturas. Essa tendência

ao esgotamento do K dos solos, aliada à grande produtividade agrícola apresentada pelo país, fez com que o Brasil se tornasse o terceiro maior consumidor de K no mundo, tendo alcançado em 2004 uma demanda de 7,0 milhões de toneladas de KCl (Lopes, 2005).

Segundo Oliveira & Souza (2001), oficialmente as reservas de sais de potássio no Brasil são de cerca de 14,5 bilhões de toneladas na forma do minério silvinita, uma mistura de silvita (KCl) com halita (NaCl), e do mineral carnalita (KCl.MgCl₂.6H₂O). Essas reservas ficam nos Estados de Sergipe e Amazonas, mais especificamente nas Bacias Sedimentares Sergipe/Alagoas e do Amazonas. Existe também uma pequena reserva no Estado do Tocantins.

Entretanto, apenas uma mina produz fertilizantes potássicos no país, a de Taquari-Vassouras, que fica no município de Rosário do Catete, em Sergipe (Lopes, 2005). A atual detentora dos direitos de lavra dessa jazida é a Companhia Vale do Rio Doce, que a arrendou da Petrobrás (Nascimento & Loureiro, 2004). A reserva minerável é de 129,6 milhões de toneladas de silvinita. A produção de KCl é de 685 mil toneladas ano⁻¹, com previsão de ampliação para 850 mil toneladas ano⁻¹, insuficiente para suprir a atual demanda pelo fertilizante, pois corresponde a cerca de 10% do necessário. A carnalita, por se encontrar a mais de 1200 m de profundidade, teve sua lavra bloqueada (Nascimento & Loureiro, 2004; Lopes, 2005). Calcula-se que no período de 1988-2000 houve um aumento de 100% na demanda de potássio. Além disso, sem a descoberta de novas jazidas e, considerando que esses minérios são recursos finitos, tem havido redução das reservas no Brasil a uma taxa de 2,3% ao ano (Oliveira & Souza, 2001).

FONTES DE POTÁSSIO

Fontes tradicionais de potássio

Aproximadamente 95% da produção mundial de potássio é utilizada na fabricação de fertilizantes, sendo que desses, 90% são para a fabricação de KCl e 5% para a fabricação de sulfato de potássio (K_2SO_4). O Canadá é o maior produtor mundial e o Brasil importa KCl desse país, da Rússia, da Alemanha e de Israel (Oliveira & Souza, 2001; Kinpara, 2003).

Apesar de o potássio estar presente na maioria das rochas e solos, as fontes econômicas desse nutriente ocorrem em camadas de sal sedimentares. Assim, os cloretos e os sulfatos podem ser encontrados em locais onde anteriormente existiam lagos ou em depósitos marinhos. Apenas dois minerais de K são amplamente utilizados na produção de fertilizantes potássicos: a silvita e a carnalita. Depósitos desses minerais, além da halita, formam-se por evaporação de águas salinas em bacias fechadas, onde ao longo dos anos vão se depositando sedimentos. Israel e Jordânia, por exemplo, produzem fertilizantes potássicos através da evaporação das águas do Mar Morto, de onde obtêm halita e carnalita (Roberts, 2005).

Além do KCl, o sulfato de potássio (K_2SO_4), o sulfato duplo de potássio e magnésio ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4$) e o nitrato de potássio (KNO_3) também são utilizados. Juntos são as fontes mais importantes de K na forma de fertilizantes, sendo o K_2SO_4 o segundo mais utilizado (Potafos, 1996).

Por conter de 58 a 62% de K_2O solúvel em água, o cloreto de potássio é mais competitivo economicamente que os outros fertilizantes. Entretanto, devido ao alto teor de cloro, não pode ser utilizado em algumas culturas, como o abacaxi

e o fumo, por prejudicar seu valor comercial. Apresenta-se ainda, como restrição ao uso desse fertilizante, o fato de não ser aceito na agricultura orgânica devido à elevada solubilidade e presença do cloro (Costa & Campanhola, 1997; Malavolta *et al.*, 2002).

O sulfato de potássio tem como vantagens o fornecimento de enxofre, além do potássio, e o fato de ser aceito na agricultura orgânica (embora com restrições). Apresenta de 50 a 52 % de K_2O e de 17 a 18% de enxofre, solúveis em água (Costa & Campanhola, 1997; Malavolta *et al.*, 2002). Na América Latina, o Chile é o principal produtor desse sal, encontrado no Salar de Atacama, com uma reserva de cerca de 80 milhões de toneladas (Roberts, 2005). Contudo, devido ao seu elevado preço, é pouco utilizado como adubo.

O sulfato duplo de potássio e magnésio apresenta 22% de K_2O , 11% de Mg e 22 a 23 % de S, solúveis em água (Malavolta *et al.*, 2002). Normalmente, esse fertilizante é obtido da langbeinita ($K_2Mg_2(SO_4)_3$), que é um importante mineral de potássio em depósitos comerciais (Roberts, 2005). O nitrato de potássio possui 44 % de K_2O e 13 % de N. Segundo Roberts (2005), o Chile talvez possua a maior reserva desse fertilizante no mundo, no Deserto de Atacama, onde há cerca de 100 milhões de toneladas do sal.

O cloreto de potássio (KCl) é a principal fonte de K disponível no mercado nacional. A dependência de importações desse fertilizante, além de desfavorecer a balança comercial brasileira, implica em questões estratégicas como a necessidade de negociações com um grupo restrito de países fornecedores para a compra de um insumo essencial à produção agrícola.

A BUSCA POR FONTES LOCAIS DE POTÁSSIO

O potássio é o sétimo elemento químico mais abundante na crosta terrestre. Entretanto, devido às suas características (dimensões e carga iônica), dificilmente forma depósitos econômicos. Embora faça parte de centenas de minerais, apenas a silvita e a carnalita são amplamente utilizadas na obtenção de K. O uso de silvinita também é comum, correspondendo ao minério explorado como fonte do nutriente no Brasil (Nascimento & Loureiro, 2004).

Existem reservas de minerais primários com teores relativamente altos de K, encontradas em quase todas as regiões do país (Távora, 1982; Nascimento & Loureiro, 2004). Todavia, a maioria dos minerais que possuem K em sua estrutura é insolúvel, havendo certa dificuldade na obtenção do elemento, o que ocorre, por exemplo, com os silicatos. Esses são minerais formados por grupos tetraédricos de SiO_4 ligados por cátions. Para Oliveira & Souza (2001), os silicatos ricos em potássio, tais como os feldspatos potássicos, a muscovita e a leucita, não se constituem importantes fontes desse nutriente, já que não são solúveis em água e suas estruturas são rompidas, apenas com dificuldade, por meios artificiais. O aproveitamento de rochas ígneas como fonte de K é restrito a áreas onde o elemento é subproduto da exploração de outras substâncias.

Há mais de 30 anos, rochas portadoras de K que ocorrem no território nacional vêm sendo estudadas como opção para o fornecimento do nutriente às plantas ou em rotas alternativas de obtenção de fertilizantes. Pesquisas sobre o uso de fontes alternativas de K foram enfatizadas entre os anos de 1970 a 1980 (Coelho, 2005). Nesse período, foram realizados vários testes, em casa de vegetação e a campo, com o objetivo de avaliar o potencial agrônomo de diversas rochas e

minerais no fornecimento de K.

Carnalita, biotita, leucita, sienito nefelínico, micaxisto, feldspato potássico, cloritaxisto, muscovita e verdete foram alguns dos materiais avaliados (Lopes *et al.* 1972; Dutra, 1980; Faquin, 1982; Eichller & Lopes, 1983; Leite, 1985). Os materiais foram aplicados puros ou em misturas com outros produtos fertilizantes, “in natura” ou após sofrerem algum processo químico (acidificação) ou térmico com o objetivo de aumentar sua reatividade e solubilização. Tentou-se desenvolver termofosfatos potássicos, processos de tratamento de rochas com teores mais elevados de K_2O , rotas hidrometalúrgicas de extração de nutrientes de rochas, entre outros. Termofertilizantes derivados de rochas silicáticas potássicas compostas por minerais com baixa solubilidade, como os verdetes de Minas Gerais (rocha rica em illita), foram obtidos por transformação em materiais vitrificados com elevada solubilidade, sendo testados com sucesso como fonte de potássio. Rochas ricas em feldspatos potássicos (minerais de baixa solubilidade) foram transformadas em kalsilita (silicato potássico de alta solubilidade) pela reação com soluções hidrotermais, comportando-se de forma similar ao KCl como fonte de potássio (Faquin, 1982; Leite, 1985).

Contudo, os resultados obtidos indicaram que, na maioria das vezes, a eficiência agrônômica das rochas dependeu da sua origem e composição, de fatores de solo, do tempo de incubação, do tratamento químico ou térmico aplicado e das culturas utilizadas. Em geral, a possibilidade de utilização direta dessas rochas foi descartada devido à baixa disponibilização de K às plantas. Foram necessários tratamentos químicos ou térmicos para aumentar a solubilidade das rochas, o que se mostrou inviável economicamente pelo elevado custo do

processamento industrial. Enfim, as estratégias testadas não representaram vantagem competitiva em relação ao fertilizante solúvel tradicional (KCl).

Muitas vezes, resultados insatisfatórios com o uso de rochas como fonte de nutrientes, estão relacionados ao desconhecimento das características mineralógicas do material utilizado. Alguns dos estudos citados utilizaram basalto, feldspato, muscovita e zeólita, materiais que contêm K, mas que apresentam solubilidade muito baixa. A mineralogia, indicador do potencial de solubilidade dos minerais e da capacidade de liberação de K, é fator extremamente importante na escolha de rochas para aplicação direta ao solo (Nascimento & Loureiro, 2004).

Os feldspatos alcalinos e os feldspatóides (silicatos anidros, similares aos feldspatos, porém com menor quantidade de silicato) são considerados fontes potenciais de potássio para a fabricação de fertilizantes, tanto na forma de sais, como na forma de termofosfatos ou para aplicação direta ao solo. Nesses dois grupos, enquadram-se o ortoclásio, o microclínio e a leucita. Os dois primeiros são feldspatos e a leucita (de ocorrência pouco comum) é um feldspatóide. As micas, dentre os minerais silicatados, apresenta grande potencial para a extração de K, devido ao seu considerável teor de K_2O e ocorrência abundante. Entretanto, para que sua utilização como fertilizante de liberação lenta, aplicado diretamente ao solo, seja realmente efetivada, são necessários estudos sobre as características químicas dos solos e a cinética de migração de íons nos mesmos, já que essas características são variáveis de acordo com o solo e as características climáticas das regiões (Nascimento & Loureiro, 2004).

De qualquer modo, além do aumento da exploração de jazidas tradicionais, a

necessidade de retomada das pesquisas no sentido de desenvolver novos produtos ou mesmo de buscar minerais que possam ser aplicados diretamente ao solo para o fornecimento de K tem sido enfatizada como forma de reduzir a dependência brasileira da importação de fertilizantes potássicos (Kinpara, 2003; Nascimento & Loureiro, 2004; Lopes, 2005).

Novas fontes alternativas de potássio

Vários tipos de rochas podem ser mais efetivos no suprimento de K, mesmo quando aplicados “*in natura*”. Os seus constituintes portadores de K são a flogopita, biotita e/ou feldspatóides, minerais que apresentam as solubilidades mais elevadas entre os silicatos. Algumas rochas mostraram significativa liberação de K em testes de laboratório, solos incubados e em cultivos controlados (casa de vegetação), apresentando potencial promissor para uso como fontes de K quando moídas e utilizadas de maneira análoga ao calcário (Resende *et al.*, 2005; Castro *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2006). Entretanto, ainda há carência de trabalhos geológicos de prospecção, sistematização e caracterização das ocorrências desses materiais alternativos existentes no território nacional (Nascimento & Loureiro, 2004).

Nos últimos anos, numa parceria entre a Embrapa Cerrados e a Universidade de Brasília, iniciaram-se estudos visando à identificação e caracterização de algumas rochas com o intuito de utilizá-las, “*in natura*”, como fontes de K para uso agrícola. Das rochas preliminarmente estudadas, cinco apresentaram características para uso potencial como fontes de potássio na agricultura: uma biotita xisto e um flogopitito, encontrados em rejeitos de mineração de esmeralda nas regiões de Nova Era (MG) e Campo Formoso (BA); uma brecha alcalina,

composta por flogopita, zeólita e feldspatóides, oriunda de Rio Verde (GO); um carbonatito, composto por carbonatos e flogopita, da região de Catalão (GO); e uma ultramáfica alcalina, rocha ígnea composta por minerais ferromagnesianos (olivina), piroxênio, feldspato, carbonato e flogopita, extraída no município de Lages (SC). De modo geral, aquelas rochas que contêm maiores quantidades de biotita ou flogopita seriam mais promissoras como fontes alternativas de K, uma vez que esses dois minerais solubilizam-se com relativa facilidade.

Estudos em casa de vegetação utilizando as rochas brecha alcalina, biotita xisto e ultramáfica alcalina como fontes de K para a soja e o milho em sucessão evidenciaram que a aplicação desses materiais, apenas moídos, contribuiu de forma significativa para o fornecimento de potássio às plantas já no primeiro cultivo em Latossolo argiloso de Cerrado, permanecendo ainda considerável efeito residual do nutriente para o cultivo subsequente. Além disso, a rocha ultramáfica alcalina forneceu também Ca e Mg e reduziu a acidez do solo (Machado *et al.*, 2005; Resende *et al.*, 2005). Considerando os efeitos de curto prazo (um ou dois cultivos em condições de casa de vegetação), essas rochas têm apresentado pelo menos 50% de eficiência agrônômica em relação à fonte solúvel (KCl). Assim sendo, tais rochas moídas poderiam ser empregadas como fontes de liberação gradual de nutrientes, o que é uma característica desejável quando se considera o efeito fertilizante mais duradouro e o menor risco de perdas, comparativamente aos adubos de alta solubilidade.

Em casa de vegetação, experimentos com girassol e soja cultivados em sucessão num Latossolo Vermelho Eutroférico muito argiloso do Estado do Paraná e num Neossolo Quartzarênico (arenoso) de Mato Grosso, indicaram

que as rochas ultramáfica e biotita podem apresentar eficiência comparável à do KCl (Castro *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2006). Testes realizados com biotita e brecha, para a sucessão soja/milheto em Argissolo e Vertissolo da região de Petrolina – PE, também demonstraram que essas rochas contribuem para o fornecimento de K e outros nutrientes, estimulando o crescimento de plantas (Mendes *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2006a,b).

A REDE DE PESQUISA DE ROCHAS FONTES DE POTÁSSIO

Os resultados iniciais obtidos reforçam a importância de se aprofundar as pesquisas envolvendo rochas com quantidades razoáveis de flogopita ou biotita, as quais devem ser testadas para uso em condições variadas de solos, culturas e sistemas agropecuários, em diferentes regiões do país. Isso se justifica pelo fato de que essas rochas são abundantes e apresentam distribuição ampla e variável no território nacional.

Assim, em 2003 foi articulada e estabelecida uma rede nacional de pesquisa, a Rede Agri-Rocha, cujo propósito principal é desenvolver estudos que viabilizem a substituição de parte das fontes convencionais de K pela utilização de rochas brasileiras. O ponto de partida se deu mediante contrapartidas do Ministério de Ciência e Tecnologia (Fundos Setoriais do Agronegócio e Mineral) e da Embrapa, dando origem a um programa de desenvolvimento tecnológico com a participação de várias fomentadoras. Atualmente compõem a rede, treze unidades da Embrapa (Sede, CPAC, CNPMS, CNPGL, CNPGC, CNPSo, CPATSA, CPPSE, CNPAB, CPATC, CNPMF, CPAF, CNPT), e diversas outras instituições de pesquisa e universidades (Empresa Baiana de Desenvolvimento Agrícola S/A – EBDA, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Companhia de Pesquisa de Recursos

Minerais – CPRM, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral – CBPM, Universidade de Brasília – UnB, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Universidade Federal da Bahia – UFBA). A Superintendência de Geologia e Mineração da Secretaria de Indústria e Comércio do Estado de Goiás participa do Projeto desde a sua concepção, contribuindo com a coleta, preparação e análise de rochas silicáticas do Centro-Oeste.

A expectativa é que um modelo de exploração similar ao que é adotado para o calcário, isto é, com vários pontos de produção espalhados pelo país, poderia viabilizar a utilização dessas rochas (Resende *et al.*, 2005). Jazidas de médio e pequeno porte, disseminadas nas principais áreas em que se desenvolvem atividades agropecuárias, podem permitir a redução dos custos de mineração, transporte e distribuição. Os preços se tornariam acessíveis e, dessa forma, essas rochas seriam competitivas em relação ao KCl, uma vez que todas as operações de mineração, processamento das rochas e de logística até as fazendas estariam restritas a um raio máximo de abrangência territorial.

Dentre os objetivos atuais da Rede, destacam-se: a) identificar, catalogar e caracterizar geoquimicamente novas ocorrências dessas rochas, especialmente nas regiões Centro-Sul e Nordeste; b) desenvolver tecnologia de moagem com a finalidade de alcançar eficiência energética no processo, granulometria adequada e viabilidade para pequenas mineradoras; c) determinar o potencial de liberação de K das rochas para o solo e seu efeito residual; d) determinar, regionalmente, a eficiência agrônômica da aplicação direta das rochas moídas como fonte de K para culturas anuais e perenes, em solos com diferentes características químicas e físicas, e em sistemas convencionais e orgânicos,

fornecendo recomendações de doses e formas de utilização aos agricultores; e) selecionar microrganismos para biossolubilização das rochas e desenvolver processos envolvendo o manejo de organismos, plantas e sistemas de cultivo, de modo a facilitar a liberação do K de acordo com a demanda das culturas; f) avaliar o impacto da aplicação dessas rochas na liberação dos demais elementos acompanhantes para o solo, sua absorção pelas plantas e seus efeitos benéficos ou fitotóxicos; e g) avaliar a viabilidade econômica do uso das rochas como fontes alternativas de K, considerando o potencial de substituição da fonte tradicional (KCl), o custo de processamento da rocha e a distribuição espacial das jazidas (localização em relação ao mercado consumidor).

PRIORIDADES DE PESQUISA E PERSPECTIVAS

Tendo em vista que as rochas que vêm sendo testadas são de composição complexa e relativamente pouco conhecidas quanto aos aspectos de sua mineração e processamento industrial (moagem) e de seu comportamento na interação com o meio onde são aplicadas (solo, plantas, organismos, ambiente), existem vários desafios a serem superados pela pesquisa.

A granulometria de moagem é um fator que vem sendo avaliado tanto em termos de eficiência no processamento industrial, quanto à influência no desempenho agrônômico das fontes. Cada mineral ou minério tem a sua moabilidade própria, que é caracterizada pela probabilidade de quebra, e pela distribuição de tamanhos gerada. Dessa forma, a etapa de moagem deve ser bem estudada antes do dimensionamento e escolha do equipamento, e muito bem controlada na operação industrial, pois o bom desempenho desta depende da utilização eficiente e direcionada da energia disponível.

Um outro aspecto importante refere-se à possibilidade de se maximizar a liberação de K das rochas mediante processos de biossolubilização. Nesse sentido, os estudos desenvolvidos até o momento demonstraram a existência de microrganismos capazes de promover a solubilização dessas rochas (Ferrari *et al.*, 2005a,b; Tosta *et al.*, 2005a,b), o que abre caminho para a geração de tecnologias de produção de fertilizantes diferenciados. A bioprospecção de grupos funcionais específicos e adaptados aos ecossistemas tropicais pode contribuir para o suprimento de nutrientes às plantas, com baixo custo econômico e ambiental e, conseqüentemente, consolidando a competitividade da agropecuária nacional. Lopes *et al.* (2000) e Trindade *et al.* (2001) verificaram que a colonização micorrízica em mamoeiro aumenta sistematicamente a absorção de K. Nesse contexto, pesquisas combinando microrganismos solubilizadores e fungos micorrízicos poderão ampliar as oportunidades de uso das rochas nos sistemas agrícolas e na produção de mudas.

A determinação do índice de eficiência agrônômica e a quantificação do efeito residual de K e de outros nutrientes presentes nas rochas selecionadas são pré-requisitos ao correto dimensionamento das recomendações de adubação com as rochas, visando à recuperação e manutenção da fertilidade do solo e ao equilíbrio nutricional nos diversos sistemas de produção. Portanto esse tipo de avaliação deverá ser realizada nas mais variadas condições experimentais, em sistemas de plantio direto, de integração lavoura-pecuária, de fruticultura e silvicultura e, ainda, contemplando as modalidades de produção convencional e orgânica.

Os sistemas orgânicos de produção representam um nicho de mercado

promissor, uma vez que permitem obter maior valor agregado na comercialização dos produtos, viabilizando a exploração agropecuária mesmo em pequena escala. Um dos princípios básicos da agricultura orgânica consiste na substituição de fertilizantes sintéticos de alta solubilidade por outros insumos que apresentem taxas de liberação de nutrientes mais ajustadas à demanda das culturas ao longo do tempo. Preferencialmente, tais insumos alternativos devem estar próximos das regiões de cultivo, o que reduz custos de transporte e aumenta a sustentabilidade da produção agrícola (Neves *et al.*, 2004). Considerando que, nos sistemas orgânicos a aplicação de cloreto de potássio é vedada e a de sulfato de potássio é aceita com restrições, o suprimento de K torna-se um ponto crítico para a produção orgânica em solos tropicais. Nesse caso, a possibilidade de utilização de rochas como fontes de K assume importância estratégica, visto que a demanda pelo nutriente poderia ser mais facilmente atendida empregando-se esses materiais “in natura”, como parte do manejo de plantas de cobertura ou em processos de compostagem para produção de adubos orgânicos enriquecidos em K.

Além do potássio, as rochas estudadas podem fornecer outros nutrientes e apresentar efeito corretivo da acidez, atuando como condicionadores de solo (Andrade *et al.*, 2002; Machado *et al.*, 2005). Dada à natureza complexa dos minerais constituintes, é necessário definir procedimentos analíticos apropriados, que permitam caracterizar satisfatoriamente sua constituição química e a biodisponibilidade dos elementos presentes, haja vista que as respostas das culturas podem estar associadas não apenas ao K proveniente das rochas, mas a fatores e efeitos conjugados, decorrentes de sua composição.

Cálcio (Ca) e magnésio (Mg) são nutrientes relativamente abundantes nessas rochas, assim como o silício (Si), considerado elemento útil para o desenvolvimento de diversas culturas, aumentando a tolerância das plantas a estresses bióticos e abióticos (Datnoff *et al.*, 1991; Anderson *et al.*, 1991; Barbosa Filho *et al.*, 2000). A presença de micronutrientes, mesmo que em baixas concentrações, pode contribuir significativamente para o atendimento da demanda das culturas, uma vez que estes são exigidos em quantidades muito pequenas pelas plantas. Efeitos benéficos para a fertilidade do solo e a nutrição das plantas podem ampliar o potencial de uso das rochas como corretivo ou fertilizante para diversas situações de solo, cultura e manejo, agregando valor aos insumos derivados dessas rochas em virtude de seu efeito multinutriente ou condicionador do solo.

A presença de elementos potencialmente prejudiciais nas rochas e a sua dinâmica no sistema solo-planta ainda precisam ser mais bem caracterizadas. O efeito danoso da presença de elementos químicos indesejáveis depende basicamente da quantidade acumulada e das formas químicas em que se apresentam no solo. A ocorrência dos metais pesados em formas solúveis, trocáveis, oclusas, precipitadas ou complexadas é que define o potencial poluidor (MacBride, 1994) e o impacto na qualidade do solo e água e toxidez às plantas e outros organismos. 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). Até o momento, as rochas estudadas não promoveram redução de crescimento ou aparecimento de sintomas visuais que pudessem ser associados a problemas desse tipo. De qualquer forma, a pesquisa com essas rochas deve contemplar o acompanhamento mais detalhado da

dinâmica e biodisponibilidade de metais pesados e outros elementos críticos em relação ao potencial de contaminação dos produtos agrícolas e do ambiente.

Imprescindível será a avaliação econômica do uso das rochas selecionadas como fontes de K em diferentes sistemas de produção agropecuária. Tudo indica que sua viabilidade em relação às fontes tradicionais dependerá da distância das jazidas às áreas produtivas. Uma vez determinado o raio de viabilidade econômica do uso das rochas em relação à localização das jazidas, será possível reduzir o custo de produção das culturas, aumentando a competitividade e sustentabilidade do agronegócio brasileiro.

Alcançadas as metas da Rede de pesquisa, o principal resultado esperado é a substituição de parte do potássio importado, por fontes derivadas de rochas nacionais, o que pode significar centenas de milhões de dólares de economia na balança comercial brasileira. Concomitante aos benefícios para o setor agropecuário, a indústria mineral seria fomentada com a ampliação das possibilidades de exploração. Toda a cadeia produtiva associada seria favorecida com a geração de empregos diretos e indiretos, distribuídos de forma difusa nas regiões produtoras e beneficiando diretamente as populações interioranas. Além disso, se criaria a possibilidade de reciclar rejeitos de mineração, uma vez que algumas dessas rochas constituem passivos ambientais, por exemplo, em garimpos de pedras preciosas. No âmbito de Ciência e Tecnologia, ao consolidar-se uma rede nacional de pesquisa com rochas, se abrirá caminho, também, para a estruturação de outras linhas de pesquisa e desenvolvimento de novos insumos agrícolas derivados de minerais e rochas existentes no território brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério de Ciência e Tecnologia, fundos setoriais Mineral e do Agronegócio pelo suporte financeiro (Contratos FINEP 2883/03 e CNPq 506313/2003-4) ao Projeto “Rochas brasileiras como fontes alternativas de potássio para uso em sistemas agropecuários”. Os autores agradecem ainda ao CNPq à concessão da bolsa de Mariana Coelho de Sena.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, D.L.; SNYDER, G.H. & MARTIN, F.G. (1991) Multi-year response of sugarcane to calcium silicate slag on Everglades Histossols. *Agronomy Journal*, 8:870-874.
- ANDRADE, L.R.M.; MARTINS, E.S. & MENDES, I.C. (2002) Carbonatites as natural source of nutrientes for Cerrados soils. In: World Congress of Soil Science, 17, Bangkok. *Proceedings*. Bangkok: ISSS. (CD-rom).
- BARBOSA FILHO, M.P.; SNYDER, G.H.; PRABHU, A.S.; DATNOFF, L.E. & KORNDÖRFER, G.H. (2000) A importância do silício para a cultura do arroz: uma revisão de literatura. *Informações Agronômicas*, n.89. 8p. (Encarte Técnico).
- CASTRO, C. de; OLIVEIRA, F. A. de; SALINET, L. H.; VERONESI, C. de O. (2006) Rochas silicáticas como fontes alternativas de potássio para a cultura do girassol. In: Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, 27. Bonito. Fertbio 2006. *Anais*. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste. (Documentos, 82).
- COELHO, A.M. (2005) O potássio na cultura do milho. In: YAMADA, T. & ROBERTS, T.L. (Eds.). *Potássio na agricultura brasileira*. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, p.612-658.
- COSTA, M.B.B. & CAMPANHOLA, C. (1997) *A agricultura alternativa no Estado de São Paulo*. Jaguariúna: Embrapa-CNPMA, 63p. (Documentos, 7).

- CURI, N.; KÄMPF, N.; MARQUES, J.J. (2005) Mineralogia e formas de potássio em solos brasileiros. In: YAMADA, T. & ROBERTS, T.L. (Eds.). *Potássio na agricultura brasileira*. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, p.91-122.
- DATNOFF, L.E.; RAID, R.N.; SNYDER, G.H. & JONES, D.B. (1991) Effect of calcium silicate on blast and brown spot intensities and yields of rice. *Plant Disease*, 75:729-732.
- DUTRA, L.G. (1980) *Minerais potássicos, acidificados ou não, utilizados como fontes de nutrientes para o milho (Zea mays L.) em casa de vegetação*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 83p.
- EICHLER, V. & LOPES, A.S. (1983) Disponibilidade do potássio do verdete de Abaeté, calcinado com e sem calcário magnesiano, para a cultura do milho (*Zea mays L.*), em solo de textura argilosa. *Ciência e Prática*, 7:136-146.
- FAQUIN, V. (1982) *Efeito do tratamento térmico do sienito nefelínico adicionado de calcário dolomítico, na disponibilidade de potássio ao milho (Zea mays L.), em casa de vegetação*. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. 115p.
- FERRARI, A.M.; ERLER, G.; LOPES ASSAD, M.L.R.C.; TOSTA, C.D. & CECCATO-ANTONINI, S.R. (2005b) Estudo microbiológico de biossolubilização de pó de rocha incubado com esterco bovino e de ave. In: Congresso de Iniciação Científica da UFSCar, 13, São Carlos. *Anais*. São Carlos: UFSCar. (CD-rom).
- FERRARI, A.M.; ERLER, G.; LOPES ASSAD, M.L.R.C.; TOSTA, C.D.; CECCATO-ANTONINI, S.R. (2005a) Biodisponibilização de potássio proveniente de pó de rochas silicáticas. In: Congresso de Iniciação Científica da UFSCar, 13, São Carlos. *Anais*. São Carlos: UFSCar. (CD-rom).
- KING, L.D. (1996) Soil heavy metals. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E. & FONTES, M.P.F. (Eds.) *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o*

desenvolvimento sustentado. Viçosa: UFV/SBCS, p.823-836.

KINPARA, D.I. (2003) *A importância estratégica do potássio para o Brasil*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 27p. (Documentos, 100).

LEITE, P.C. (1985) *Efeitos de tratamentos térmicos em misturas de verdete de Abaeté, fosfato de Araxá e calcário magnésiano, na disponibilidade de potássio e fósforo*. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras. 146p.

LOPES, A.S. (2005) Reservas de minerais de potássio e produção de fertilizantes potássicos no Brasil. In: YAMADA, T. & ROBERTS, T.L. (Eds.). *Potássio na agricultura brasileira*. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, p.21-32.

LOPES, A.S.; FREIRE, J.C.; AQUINO, L.H. & FELIPE, M.P. (1972) Contribuição ao estudo da rocha potássica - Verdete de Abaeté (Glauconita) para fins agrícolas. *Agros*, 2:32-42.

LOPES, L.C.; SANTOS, C.G.; TRINDADE, A.V.; PEIXOTO, M.F.; AZI, J.R. & MAIA, I.C.S. (2000) Efeito da associação micorrízica na resposta do mamoeiro (*Carica papaya* L.) ao potássio. In: Congresso Brasileiro de Fruticultura. Fortaleza, *Anais*. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical. (CD-rom).

MACBRIDE, M.D. (1994) *Environmental chemistry of soils*. New York: Oxford University, 406p.

MACHADO, C.T.T.; RESENDE, A.V.; MARTINS, E.S.; SOBRINHO, D.A.S.; NASCIMENTO, M.T.; FALEIRO, A.S.G.; LINHARES, N.W.; SOUZA, A.L. & CORAZZA, E.J. (2005) Potencial de rochas silicáticas no fornecimento de potássio para culturas anuais: II. Fertilidade do solo e suprimento de outros nutrientes. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 30. Recife, *Anais*. Recife: UFRPE/SBCS.

MALAVOLTA, E.; PIMENTEL-GOMES, F. & ALCARDE, J.C. (2000) *Aubos e adubações*. São Paulo: Nobel, 200p.

MENDES, A.M.S.; SILVA, D.J.; FARIA, C.M.B.; MORAIS, A.T. (2006) Potencial de rochas

- silicáticas no fornecimento de nutrientes para milho: 1. Micronutrientes. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 16. Aracajú, *Anais*. Aracajú: UFS/SBCS. (CD-rom).
- NASCIMENTO, M. & LOUREIRO, F.E.L. (2004) *Fertilizantes e sustentabilidade: o potássio na agricultura brasileira, fontes e rotas alternativas*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 66 p. (Série Estudos e Documentos, 61).
- NEVES, M.C.P.; ALMEIDA, D.L.; DE-POLLI, H.; GUERRA, J.G.M. & RIBEIRO, R.L.D. (2004) *Agricultura orgânica: uma estratégia para o desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis*. Seropédica: Editora da UFRRJ, Rio de Janeiro, 98p.
- OLIVEIRA, F.A.; CASTRO, C.; SALINET, L.H. (2006) Adubação potássica residual com rochas silicáticas para a cultura da soja. In: Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, 27. Bonito. *Fertbio. Anais*. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. (CD-rom). (Documentos, 82).
- OLIVEIRA, L.A.M. DE; SOUZA, A.E. (2001) *Balanço Mineral Brasileiro 2001: potássio*. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/potassio.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2007.
- POTAFOS (1996) *Nutri-fatos: informação agrônômica sobre nutrientes para as culturas*. Piracicaba: Potafos, 24p. (Arquivo do Agrônomo, 10).
- RESENDE, A.V.; MACHADO, C.T.T.; MARTINS, E.S.; NASCIMENTO, M.T.; SOBRINHO, D.A.S.; FALEIRO, A.S.G.; LINHARES, N.W.; SOUZA, A.L. & CORAZZA, E.J. (2005) Potencial de rochas silicáticas no fornecimento de potássio para culturas anuais: I. Respostas da soja e do milho. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 30. Recife, *Anais*. Recife: UFRPE/SBCS. (CD-rom).
- ROBERTS, T.L. (2005) World reserves and production of potash. In: YAMADA, T. & ROBERTS, T.L. (Eds.). *Potássio na agricultura brasileira*. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, p.1-20.

- SILVA, D.J.; FARIA, C.M.B.; MENDES, A.M.S. & MORAIS, A.T. (2006a) Potencial de rochas silicáticas no fornecimento de macronutrientes para soja. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 16. Aracajú, *Anais*. Aracajú: UFS/SBCS. (CD-rom).
- SILVA, D.J.; FARIA, C.M.B.; MENDES, A.M.S.; MORAIS, A.T., SILVA, E.J.; SILVA, E.A.R. (2006b) Avaliação do potencial de rochas silicáticas no crescimento de culturas anuais no Submédio São Francisco: 1. Soja e milho. In: Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, 27. Bonito, *Anais*. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste/SBCS. (CD-rom). (Documentos, 82).
- TÁVORA, J.E.M. (1982) Reservas minerais de potássio e suas explorações. In: YAMADA, T.; IGUE, K.; MUZILLI, O. & USHERWOOD, N.R. (Eds.). *Potássio na agricultura brasileira*. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, p.37-50.
- TOSTA, C.D.; LOPES ASSAD, M.L.R.C.; FERRARI, A.M.; ERLER, G. & CECCATO-ANTONINI, S.R. (2005a) Biossolubilização de potássio de rocha ultramáfica por *Aspergillus niger*. In: Congresso Brasileiro de Microbiologia, 23. Santos, *Anais*. Santos: SBM. (CD-rom).
- TOSTA, C.D.; LOPES ASSAD, M.L.R.C.; FERRARI, A.M.; ERLER, G.; CECCATO-ANTONINI, S.R. (2005b) Bissolubilização de potássio de brecha por *Aspergillus niger*. In: Workshop Internacional sobre Microbiologia Ambiental, 1. Campinas, *Anais*. Campinas: Unicamp. (CD-rom).
- TRINDADE, A.V.; SIQUEIRA, J.O. & ALMEIDA, F.P. (2001) Dependência micorrízica de variedades comerciais de mamoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 36:1485-1494.
- VILELA, L.; SOUSA, D.M.G. & SILVA, J.E. (2004) Adubação potássica. In: SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E. (Eds.). *Cerrado: correção do solo e adubação*. Planaltina: Embrapa Cerrados, p.169-183.