

2ª Edição revisada e ampliada

EDITORES: ADÃO BENVINDO DA LUZ & FERNANDO A. FREITAS LINS

# ROCHAS & MINERAIS INDUSTRIAIS

## usos e especificações



## SUMÁRIO

### PARTE I: INTRODUÇÃO GERAL

01. PANORAMA DAS ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS NO BRASIL <i>Fernando A. Freitas Lins</i>	3
---	---

02. DESEMPENHO FUNCIONAL DOS MINERAIS INDUSTRIAIS: DESAFIOS TECNOLÓGICOS, FERRAMENTA DE MARKETING E ESTRATÉGIA DE VALORIZAÇÃO <i>Renato R. Ciminelli</i>	25
--	----

### PARTE II: ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS: USOS E ESPECIFICAÇÕES

03. AGALMATOLITO <i>Adão Benvindo da Luz, Paulo Tomedi e Rodrigo Martins</i>	69
---	----

04. AMIANTO <i>Normando Claudino Moreira de Queiroga, William Bretas Linares, Joselito Dasio da Silva e Adão Benvindo da Luz</i>	79
---	----

05. AREIA INDUSTRIAL <i>Adão Benvindo da Luz e Fernando A. Freitas Lins</i>	103
--	-----

06. AGROMINERAIS - ENXOFRE <i>Gildo de Araújo Sá C. de Albuquerque (in memoriam), Ronaldo Simões L. Azambuja (in memoriam) e Fernando A. Freitas Lins</i>	125
--	-----

07. AGROMINERAIS - FOSFATO <i>Francisco E. Lápido Loureiro, Marisa Bezerra de Mello Monte e Marisa Nascimento</i>	141
--	-----

08. AGROMINERAIS - POTÁSSIO <i>Marisa Nascimento, Marisa Bezerra de Mello Monte e Francisco E. Lápido Loureiro</i>	175
---	-----

09. AGROMINERAIS - ROCHAS SILICÁTICAS COMO FONTES MINERAIS ALTERNATIVAS DE POTÁSSIO PARA A AGRICULTURA <i>Éder de Souza Martins, Claudinei Gouveia de Oliveira, Álvaro Vilela de Resende e Marcello Silvino Ferreira de Matos</i>	205
---	-----

10. ARGILA - ATAPULGITA E SEPIOLITA <i>Adão Benvindo da Luz e Salvador Luiz M. de Almeida</i>	223
--	-----

11. ARGILA - BENTONITA <i>Adão Benvindo da Luz e Cristiano Honório de Oliveira</i>	239
---	-----

12. ARGILA - CAULIM	255
<i>Adão Benvindo da Luz, Antônio Rodrigues de Campos, Eduardo Augusto de Carvalho, Luis Carlos Bertolino e Rosa Bernstein Scorzelli</i>	
13. BARITA	295
<i>Adão Benvindo da Luz e Carlos Adolpho Magalhães Baltar</i>	
14. BAUXITA	311
<i>João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade e Achilles Junqueira Bourdot Dutra</i>	
15. BERILO	339
<i>Marcelo Soares Bezerra e Júlio de Rezende Nesi</i>	
16. CALCÁRIO E DOLOMITO	363
<i>João Alves Sampaio e Salvador Luiz Matos de Almeida</i>	
17. CIANITA REFRACTÁRIA	389
<i>Caroline Meira Lopes de Castro Joffily e Claudinei Gouveia de Oliveira</i>	
18. CROMITA	403
<i>João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade e Paulo Renato Perdigão Paiva</i>	
19. DIAMANTE	427
<i>Mario Jorge Costa e Adão Benvindo da Luz</i>	
20. DIATOMITA	451
<i>Silvia Cristina Alves França, Adão Benvindo da Luz e Paulo Francisco Inforçati</i>	
21. FELDSPATO	467
<i>Adão Benvindo da Luz, Fernando A. Freitas Lins e José Mario Coelho</i>	
22. FLUORITA	487
<i>João Alves Sampaio, Carlos Adolpho Magalhães Baltar e Mônica Calixto de Andrade</i>	
23. GIPSITA	505
<i>Carlos Adolpho Magalhães Baltar, Flavia de Freitas Bastos e Adão Benvindo da Luz</i>	
24. GRAFITA	527
<i>João Alves Sampaio, Paulo Fernando Almeida Braga e Achilles Junqueira Bourdot Dutra</i>	
25. HALITA	551
<i>Paulo Roberto Cabral de Melo, Renato Senna de Carvalho e Dorival de Carvalho Pinto</i>	

26. LÍTIÓ	585
<i>Paulo Fernando Almeida Braga e João Alves Sampaio</i>	
27. MAGNESITA	605
<i>Luís Rodrigues Armôa Garcia, Paulo Roberto Gomes Brandão e Rosa Malena Fernandes Lima</i>	
28. MANGANÊS	633
<i>João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade, Achilles Junqueira Bourdot Dutra e Márcio Torres Moreira Penna</i>	
29. MICA	649
<i>Carlos Adolpho Magalhães Baltar, João Alves Sampaio e Patrícia Maria Tenório Cavalcante</i>	
30. NEFELINA SIENITO	663
<i>João Alves Sampaio, Sílvia Cristina Alves França e Paulo Fernando Almeida Braga</i>	
31. QUARTZO	681
<i>Pedro Luiz Guzzo</i>	
32. RMIS: ROCHAS E MINERAIS PARA CERÂMICA DE REVESTIMENTO	723
<i>Mônica Calixto de Andrade, João Alves Sampaio, Adão Benvindo da Luz e Alberto Buoso</i>	
33. RMIS: ARGILA PARA CERÂMICA VERMELHA	747
<i>Marsis Cabral Junior, José Francisco Marciano Motta, Amilton dos Santos Almeida e Luiz Carlos Tanno</i>	
34. RMIS: ARGILA PLÁSTICA PARA CERÂMICA BRANCA	771
<i>José Francisco Mariano Motta, Adão Benvindo da Luz, Carlos Adolpho Magalhães Baltar, Marcelo Soares Bezerra, Marsis Cabral Júnior e José Mario Coelho</i>	
35. TALCO	793
<i>Ivan Falcão Pontes e Salvador Luiz Matos de Almeida</i>	
36. TERRAS-RARAS	817
<i>Simon Rosental</i>	
37. TITÂNIO: MINERAIS DE TITÂNIO	841
<i>Carlos Adolpho Magalhães Baltar, João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade e Dorival de Carvalho Pinto</i>	
38. VERMICULITA	865
<i>José Fernandes de Oliveira Ugarte, João Alves Sampaio e Sílvia Cristina Alves França</i>	
39. ZEOLITAS NATURAIS	889
<i>Nélio das Graças de Andrade da Mata Resende, Marisa Bezerra de Mello Monte e Paulo Renato Perdigão Paiva</i>	
40. ZIRCONITA	917
<i>Luiz Carlos Bertolino, Nely Palermo, João Alves Sampaio e Sílvia Cristina Alves França</i>	

**PARTE III: OS MINERAIS E O MEIO AMBIENTE**

41. MINERAIS APLICADOS À TECNOLOGIA AMBIENTAL: MINERAIS VERDES 933  
*Silvia Cristina Alves França, José Fernandes de Oliveira Ugarte e Adriana de A. Soeiro da Silva*
42. EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL E AMBIENTAL A POEIRAS DE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS 961  
*Zuleica Carmen Castilhos, Reiner Neumann e Olívia Bezerra*

**GLOSSÁRIO**

## CAPÍTULO 9

# Agrominerais – Rochas Silicáticas como Fontes Minerais Alternativas de Potássio para a Agricultura

Éder de Souza Martins<sup>1</sup>  
Claudinei Gouveia de Oliveira<sup>2</sup>  
Álvaro Vilela de Resende<sup>3</sup>  
Marcello Silvino Ferreira de Matos<sup>4</sup>

### 1. 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 quantidades elevadas de fertilizantes, que englobam cerca de 40% dos custos variáveis de produção. Há, contudo, a necessidade de se 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 2007, foram produzidas 471 mil toneladas de K<sub>2</sub>O, correspondendo 11% da demanda nacional, que atingiu 4,7 Mt. A importação para atender o consumo foi de 4,1 Mt, equivalendo a US\$ 1,5 bilhão (Oliveira, 2008).

Há previsões de que a demanda brasileira de K<sub>2</sub>O cresça 50% até 2015, ou seja, um consumo da ordem de 7,0 Mt naquele ano. O aumento recente dos preços internacionais dos fertilizantes tende a agravar o déficit comercial. Com efeito, em 2006 o preço médio de importação de potássio foi US\$ 297/t de K<sub>2</sub>O, enquanto em 2007 atingiu US\$ 370/t. No primeiro semestre de 2008, o país importou 2,2 Mt a um preço médio de US\$ 640/ t de K<sub>2</sub>O. Mesmo admitindo-se um recuo dos preços para US\$ 500/t, pode-se prever que, por volta de 2015, a balança comercial será onerada em mais de US\$ 3 bilhões por ano. Situação que pode ser agravada com a previsível exaustão das reservas de Taquari-Vassouras em Sergipe e fechamento da única unidade produtiva de potássio, operada pela Vale, em meados da próxima década.

---

<sup>1</sup>Geólogo/UnB, D.Sc. em Geologia/UnB, Pesquisador da EMBRAPA, Embrapa Cerrados.

<sup>2</sup>Geólogo/UnB, D.Sc. em Geologia /UnB, Professor Associado do IG-UnB.

<sup>3</sup>Engº Agrônomo/UFL, D.Sc. em Ciências do Solo/UFL.

<sup>4</sup>Geólogo/UnB, recém-graduado.

Há a expectativa de que um novo empreendimento da Vale, também em Sergipe, possa resultar na produção de 800 mil toneladas de  $K_2O$ , mas ainda há incertezas sobre a viabilidade tecnológica do projeto; e também sobre o aproveitamento das reservas de Nova Olinda, no Estado do Amazonas. De todo modo, é difícil reverter, nos próximos anos, o quadro de grande dependência externa. Esse panorama exige uma ação coordenada para buscar fontes alternativas de K.

Resultados obtidos em pesquisas anteriores indicam que rochas contendo quantidades razoáveis de flogopita ou biotita podem constituir fontes alternativas de K para uso agrícola. Algumas das rochas com potencial de uso agrônomo incluem rochas magmáticas alcalinas (por exemplo: carbonatitos, kimberlitos, kamafugitos, flogopititos), rochas metassedimentares cálcio-silicáticas e produtos de metassomatismo potássico (por exemplos: biotita xisto, flogopita xisto, biotitito, flogopitito), com distribuição ampla e variável em todo o território nacional. A prospecção, caracterização geoquímica, definição de métodos de processamento e avaliação agrônoma sistemática dessas rochas poderão resultar na identificação de fontes alternativas eficientes do nutriente, sobretudo de potássio, dando origem a um novo grupo de insumos agrícolas.

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 dessas rochas 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.

Neste capítulo, discute-se a estratégia de trabalho da rede nacional de pesquisa de rochas como fontes alternativas de potássio e outros nutrientes, além de resultados preliminares obtidos em experimentos realizados em casa-de-vegetação e no campo.

## **2. MINERALOGIA E GEOLOGIA**

### **Fontes Tradicionais de Potássio**

Cerca de 95% da produção mundial de potássio são utilizadas 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 Brasil importa o potássio

principalmente do Canadá (29%), o maior produtor mundial, da Rússia (19%), da Bielorrússia e Alemanha (18% de cada país) e de Israel (12%) (Oliveira, 2008).

Apesar da existência de potássio na maioria das rochas e solos, as fontes econômicas desse nutriente estão associadas a depósitos evaporíticos sedimentares na forma de cloretos e sulfatos. Apenas dois minerais de K (silvita e carnalita) são amplamente utilizados na produção de fertilizantes potássicos. Depósitos desses minerais (além da halita) formam-se por evaporação de águas salinas em bacias restritas. Israel e Jordânia, por exemplo, produzem fertilizantes potássicos por meio 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 ( $K_2SO_4.MgSO_4$ ) e o nitrato de potássio ( $KNO_3$ ) também são utilizados. Juntos, são as fontes mais importantes de K para 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. Há restrição ao uso desse fertilizante, o fato de não ser aceito na agricultura orgânica devido à elevada solubilidade e a existência do cloro (Costa e 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 e 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 com 22% de  $K_2O$ , 11% de Mg e 22 a 23% de S, solúveis em água (Malavolta *et al.*, 2002), normalmente, 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, 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.

### **3. MINERAIS E MATERIAIS ALTERNATIVOS**

#### **A Busca por Fontes Locais de Potássio**

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

Existem reservas de minerais primários com teores relativamente altos de K, encontradas em quase todas as regiões do país (Távora, 1982; Nascimento e Loureiro, 2004). Todavia, a maioria dos minerais que possuem K em sua estrutura é insolúvel ou pouco solúvel, havendo certa dificuldade na obtenção do elemento, o que ocorre, por exemplo, com os silicatos. Esses são minerais formados por grupos tetraédricos de  $\text{SiO}_4$  ligados por cátions (Nascimento e Loureiro, 2004). Para Oliveira e 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. Já o aproveitamento de rochas ígneas como fonte de K é restrito a áreas onde o elemento é subproduto da exploração de outras substâncias.

Há décadas, 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 no campo, com o objetivo de avaliar o potencial agrônômico de diversas rochas e minerais no fornecimento de K.

Carnalita, biotita, leucita, nefelina sienita, mica xisto, feldspato potássico, clorita xisto, muscovita e verdete foram alguns dos minerais e rochas avaliados (Lopes *et al.* 1972; Dutra, 1980; Faquin, 1982; Eichler e Lopes, 1983; Leite, 1985). As rochas e minerais foram aplicadas puras ou em misturas, *in natura*, ou após sofrerem algum processo químico (acidificação) ou térmico com o objetivo de aumentar a reatividade e solubilização desses materiais. 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 o verdete do Grupo Bambuí, de Minas Gerais (rocha rica em illita), foram obtidos por transformação em materiais vitrificados com elevada solubilidade e 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 constituem 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, feldspatos, muscovita e zeólitas, todavia com 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 e Loureiro, 2004).

Os feldspatos alcalinos e os feldspatóides (silicatos anidros similares aos feldspatos, porém com menor quantidade de sílica) 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, constituem o 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 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 e Loureiro, 2004).

De qualquer modo, 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, além do aumento da exploração de jazidas tradicionais, tornou-se a forma de reduzir a dependência brasileira da importação de fertilizantes potássicos (Kinpara, 2003; Nascimento e Loureiro, 2004; Lopes, 2005).

### **Novas Fontes Alternativas de Potássio**

Várias rochas podem ser mais efetivas no suprimento de K, mesmo quando aplicados *in natura*. Os minerais portadores de K nessas rochas são flogopita, biotita e/ou feldspatóides, os quais possuem as solubilidades mais elevadas entre os silicatos. Esses minerais mostraram significativa liberação de K em testes de laboratório e em solos incubados. Tais rochas têm apresentado potencial promissor para uso como fontes de K quando moídas e utilizadas de maneira análoga ao calcário (Castro *et al.*, 2005; Resende *et al.*, 2005). Entretanto, ainda há carência de trabalhos geológicos de prospecção, sistematização e caracterização das ocorrências desses materiais alternativos existentes no território nacional (Nascimento e Loureiro, 2004).

Nos últimos anos, numa parceria entre a Embrapa Cerrados e a Universidade de Brasília, iniciaram-se estudos visando a 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 possuíam características para uso potencial como fontes de potássio na agricultura: biotita xisto e o flogopitito, rochas metassomáticas encontradas em

rejeitos de mineração de esmeralda nas regiões de Nova Era e Itabira, Minas Gerais (Figuras 1, 2A e 2B), e Campo Formoso, Bahia; brecha vulcânica alcalina, composta por minerais ferromagnesianos, feldspatóides, zeólita e vidro vulcânico, oriunda de Rio Verde, Goiás; carbonatito, composto por carbonatos, flogopita e minerais ferro-magnesianos, da região de Catalão, Goiás; e ultramáfica alcalina, rocha composta por minerais ferromagnesianos (olivina, piroxênio), plagioclásio e flogopita, obtida no município de Lages, Santa Catarina. De modo geral, as rochas com concentração modal acima de 30% de biotita ou flogopita foram as rochas selecionadas para estudos como fontes alternativas de K.

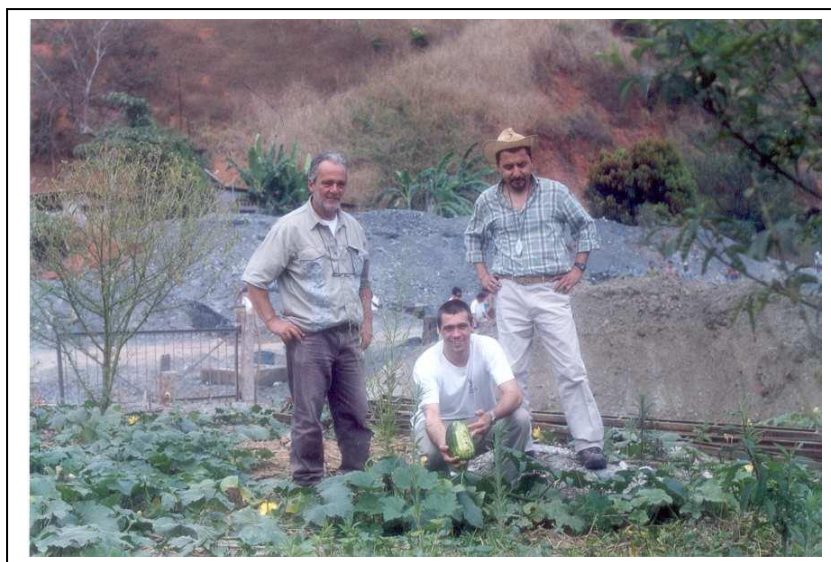


Figura 1 – Biotita-flogopita xisto encontrado como estéril da lavra de esmeralda do distrito de Nova Era-Itabira, Minas Gerais. Notar o crescimento de abóbora diretamente sobre o rejeito e sem adição de fertilizantes.

Estudos em casa-de-vegetação utilizando brecha vulcânica alcalina, biotita-flogopita xisto e ultramáfica alcalina como fontes de K para a soja e o milho 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 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 em torno de, 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. Castro *et al.* (2005) também conduziram estudos em casa-de-vegetação, com girassol e soja, e verificaram que as rochas ultramáfica alcalina e biotita-flogopita xisto apresentaram eficiência comparável à do KCl.

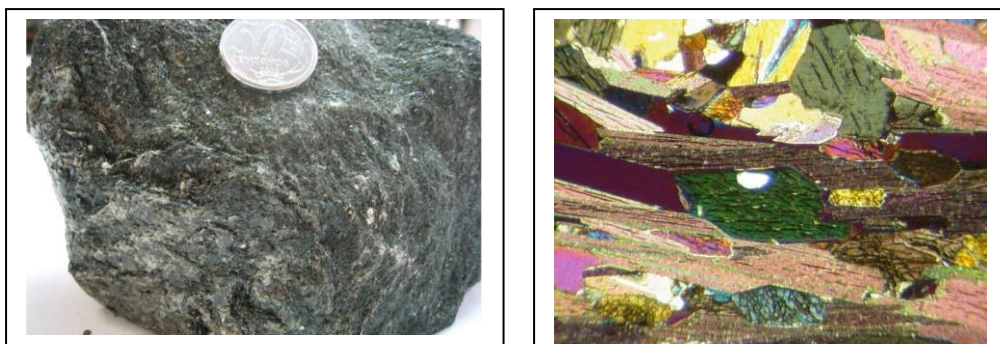


Figura 2 – (2A) Biotita-flogopita xisto, rocha hospedeira da esmeralda dos depósitos do distrito de Nova Era-Itabira, Minas Gerais. (2B) Fotomicrografia do biotita- flogopita xisto destacando lamelas de biotita e flogopita em associação com anfibólio da matriz meta-ultrabásica reliquiar.

## 4. PESQUISA E PERSPECTIVAS FUTURAS

### A Rede de Pesquisa de Rochas Silicáticas como Fontes de Potássio

Os resultados iniciais obtidos reforçam a importância de se aprofundar as pesquisas relacionadas a rochas com quantidades razoáveis de flogopita e/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 com distribuição ampla e variável no território nacional.

Assim, em 2003 foi articulada e estabelecida uma Rede Nacional de Pesquisa 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, unidades da Embrapa (Embrapa Cerrados - CPAC, Embrapa de Milho e Sorgo - CNPMS, Embrapa Gado de Leite - CNPGL, Embrapa Gado de Corte - CNPGC, Embrapa Soja - CNPSo, Embrapa Semi-Árido - CPATSA, Embrapa Pecuária Sudeste - CPPSE, Embrapa Agrobiologia - CNPAB, Embrapa Tabuleiros Costeiros - CPATC, Embrapa Mandioca e Fruticultura - CNPMF, Embrapa Arroz e Feijão - CNPAF, Embrapa Trigo - CNPT), Universidade de Brasília – UnB, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Universidade Federal da Bahia – UFBA, e diversas outras instituições de pesquisa (Empresa Baiana de Desenvolvimento Agrícola S/A – EBDA, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM e a Superintendência de Geologia e Mineração de Goiás – SGM). 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. 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 (Resende *et al.*, 2005), uma vez que toda as operações de mineração, processamento das rochas e de logística até as fazendas estariam restritas a um raio máximo de abrangência territorial, condicionado pela viabilidade econômica. Dentre os objetivos atuais da Rede, destacam-se:

- (i) identificar, catalogar e caracterizar geoquimicamente novas ocorrências dessas rochas, especialmente nas regiões Centro-Sul e Nordeste;
- (ii) desenvolver tecnologia de moagem com a finalidade de alcançar eficiência energética no processo, granulometria adequada e viabilidade para pequenas mineradoras;
- (iii) determinar o potencial de liberação de K das rochas para o solo e seu efeito residual;
- (iv) 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;

- (v) 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;
- (vi) 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;
- (vii) 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**

Vários são os fatores que estão associados às rochas usadas como fontes alternativas de potássio e que constituem os desafios da pesquisa, dentre outros destacam:

- (i) a complexa composição das rochas;
- (ii) localização dos depósitos dessas rochas em relação ao local de aplicação;
- (iii) os métodos de lavra e os processos de moagem, que devem ser de baixo custo;
- (iv) o comportamento dessas rochas na interação com o meio onde são aplicadas (solo, plantas, organismos, ambiente, dentre outros).

A granulometria de moagem é um fator que vem sendo avaliado tanto em termos de eficiência no processamento industrial, quanto à influência no desempenho agrônomo 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 dos equipamentos, pois o bom desempenho desta etapa do processo 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 silicáticas mediante processos de biossolubilização. Nesse sentido, os estudos desenvolvidos até o momento demonstraram existência de microrganismos capazes de promover a solubilização dessas rochas

(Ferrari *et al.*, 2005a, Tosta *et al.*, 2005), 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, realizada por fungos simbióticos em raízes no solo, 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 contidos 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 formam 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 incluem taxas de liberação de nutrientes mais ajustadas à demanda das culturas ao longo do tempo. O desejável é que esses 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). Uma vez 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 essas rochas em aplicação direta ao solo, como parte do manejo de plantas de cobertura ou em processos de compostagem para produção de adubos orgânicos enriquecidos em K.

Além do potássio, algumas rochas podem fornecer outros nutrientes e apresentam efeito alcalinizante, 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 a composição e biodisponibilidade de elementos existentes nas rochas, uma vez 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 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 existência 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 multi-nutriente ou condicionador do solo.

Os elementos contidos nas rochas, potencialmente, prejudiciais e a sua dinâmica no sistema solo/planta, carecem de melhor caracterização. O efeito danoso desses 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 provoca 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 devem 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 definição de novos tipos de minério. Neste caso, 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, criar-se-ia a possibilidade de reciclar rejeitos de mineração, uma vez que algumas dessas rochas constituem passivos ambientais em garimpos de pedras preciosas (Foto 1). No âmbito de Ciência e Tecnologia, ao consolidar uma rede nacional de pesquisa com rochas, se abrirá caminho, também, para a estruturação de outras linhas de pesquisa para o desenvolvimento de novos insumos agrícolas derivados de minerais e rochas existentes no território brasileiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, D. L.; SNYDER, G. H. e 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. e 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. e KORNDÖRFER, G. H. (2000) A importância do silício para a cultura do arroz: uma revisão de literatura. *Informações Agronômicas*, nº 89. 8p. (Encarte Técnico).

- CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A. e SALINET, L. H. 2005. Rochas Brasileiras como fontes alternativas de potássio para uso em sistemas agropecuários – efeito residual. In: Reunião Nacional de Pesquisa em Girassol, 16, Londrina, Anais. Londrina: Embrapa Soja. (CD-rom).
- COELHO, A. M. 2005. O potássio na cultura do milho. In: YAMADA, T. e ROBERTS, T. L. (Eds.). Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, p. 612-658
- COSTA, M. B. B. e 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. e ROBERTS, T. L. (Eds.). Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, p. 91-122.
- DATNOFF, L. E.; RAID, R.N.; SNYDER, G. H. e 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). Mineraias potássicas, 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. e LOPES, A. S. (1983). Disponibilidade do potássio do verdete de Abaeté, calcinado com e sem calcário magnésiano, 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.; ASSAD, M. L. R. C. L.; TOSTA, C. D. e 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).

- FERRARI, A. M.; ERLER, G.; ASSAD, M. L. R. C. L.; TOSTA, C. D. e 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, 2005. Anais. São Carlos: UFSCar. (CD-rom).
- KING, L. D. (1996). Soil heavy metals. In: ALVAREZ V., V. H.; FONTES, L. E. 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 magnesiano, 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. e ROBERTS, T. L. (Eds.). Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, p. 21-32.
- LOPES, A. S.; Freire, J. C.; Aquino, L. H. e 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. e 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. e 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. (CD-rom).

- MALAVOLTA, E.; PIMENTEL-GOMES, F. e ALCARDE, J. C. (2000). Adubos e adubações. São Paulo: Nobel, 200p.
- NASCIMENTO, M. E 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.; ALMEIRA, D. L.; DE-POLLI, H.; GUERRA, J. G. M. e RIBEIRO, R. L. D. (2004). Agricultura orgânica: uma estratégia para o desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis. Seropédica: Editora da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 98p.
- OLIVEIRA, L.A.M. (2008). Sumário Mineral: potássio. DNPM (versão preliminar).
- OLIVEIRA, L.A.M. (2008). Potássio, Sumário Mineral - DNPM, <http://www.dnpm.gov.br> (acesso em 12 de julho de 2008).
- 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. e 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. e Roberts, T.L. (Eds.). Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, p. 1-20.
- TÁVORA, J. E. M. (1982). Reservas minerais de potássio e suas explorações. In: Yamada, T.; Igue, K.; Muzilli, O. e Usherwood, N.R. (Eds.). Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, p. 37-50.
- TOSTA, C. D.; ASSAD, M. L. R. C. L.; FERRARI, A. M.; ERLER, G. e CECCATO-ANTONINI, S. R. (2005). Biossolubilização de potássio de rocha ultramáfica por *Aspergillus niger*. In: Congresso Brasileiro de Microbiologia, 23. Santos, Anais. Santos: SBM. (CD-rom).

- TRINDADE, A. V.; SIQUEIRA, J. O. e ALMEIDA, F. P. (2001). Dependência micorrízica de variedades comerciais de mamoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 36:1485-1494.
- VILELA, L.; SOUSA, D. M. G. e SILVA, J. E. (2004). Adubação potássica. In: Sousa, D.M.G. e Lobato, E. (Eds.). *Cerrado: correção do solo e adubação*. Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 169-183.