

Influência do enxofre elementar adicionado em um resíduo da mineração visando à liberação de nutrientes no solo

Influence of elementary added sulfur on a mining waste for nutrient release in soil

Rayanne Maria Galdino Silva^{1*} , Josinaldo Lopes Araújo Rocha² , Viviane Borges Dias² , Renilton Correia da Costa² , Elidayane da Nóbrega Santos² 

RESUMO

No estado da Paraíba e no Brasil, a exploração do mineral vermiculita tem gerado grande volume de resíduos no entorno das mineradoras, que tem se tornado um passivo ambiental significativo, com potencial poluente ou contaminante. Dessa forma, neste trabalho, objetivou-se avaliar a influência de proporções do enxofre elementar (fonte p.a) adicionado ao resíduo da exploração de vermiculita sobre a liberação de nutrientes no solo. Para tanto, foi realizado experimento em delineamento inteiramente casualizado em fatorial 5x8, sendo 5 proporções de enxofre elementar (0, 50, 100, 150 e 200 g.kg⁻¹) adicionadas ao resíduo de vermiculita e 8 períodos de incubação (0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 e 105 dias) da mistura resíduo-enxofre, com 4 repetições, totalizando 160 parcelas experimentais. Durante 105 dias de incubação, a cada 15 dias, foram determinados, na mistura solo-resíduo-enxofre, os teores disponíveis de K, Na, Ca, Mg, P, SO₄⁻² e os valores de pH. O resíduo de mineração associado ao enxofre elementar proporcionou, na mistura, aumento significativo nos teores de sulfato, cálcio e fósforo disponíveis, redução do pH e dos teores de K. Os teores de Mg não foram influenciados pela adição do "aditivo"; já em relação aos teores de Na, houve aumento significativo. Conclui-se que a mistura rejeito-enxofre tem potencial para incrementar os teores de alguns nutrientes do solo. Contudo, seu uso pode ser limitado em solos com dificuldade de drenagem em razão do acúmulo excessivo de sódio trocável.

Palavras-chave: mineral silicatado; vermiculita; oxidação de enxofre; fertilizante; luvisolo.

ABSTRACT

In the state of Paraíba and in Brazil, the exploitation of the vermiculite mineral has generated a large volume of waste in the vicinity of the mining companies, which has become a significant environmental liability, with polluting or contaminating potential. Thus, in this work, the objective was to evaluate the influence of proportions of elemental sulfur (source p.a) added to the vermiculite exploration residue on the release of nutrients in the soil. For this purpose, an experiment was carried out in a completely randomized design in a 5 × 8 factorial, with five proportions of elemental sulfur (0, 50, 100, 150 and 200 g.kg⁻¹) added to the vermiculite residue and eight incubation periods (0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 and 105 days of incubation) of the residue-sulfur mixture, with four replications, totaling 160 experimental plots. During 105 days of incubation, every 15 days, the available contents of K, Na, Ca, Mg, P, SO₄⁻² and pH values were determined in the soil-residue-sulfur mixture. The mining residue associated with elemental sulfur, provided in the mixture, significant increase in the contents of sulfate, calcium and phosphorus available, reduction of the pH and of the contents of K. The contents of Mg were not influenced by the addition of the "additive", already in relation to Na levels, there was a significant increase. In conclusion, It is concluded that the sulfur-tailing mixture has the potential to increase the contents of some nutrients in the soil, however, its use may be limited in soils with drainage difficulties due to excessive accumulation of exchangeable sodium.

Keywords: silicate mineral; vermiculite; sulfur oxidation; fertilizer; luvisol.

¹Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba - João Pessoa (PB), Brasil.

²Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Pombal (PB), Brasil.

*Autora correspondente: rayannemaria2014@gmail.com

Conflito de interesses: os autores declaram não haver conflito de interesses.

Financiamento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Recebido: 12/11/2019 - Aceito: 18/02/2020 - Reg. ABES: 20190360

INTRODUÇÃO

A mineração é a segunda atividade que mais causa impactos ambientais no mundo, perdendo apenas para as atividades agropecuárias por não se estenderem geralmente por extensas áreas, isto é, por gerar impactos mais pontuais. No entanto, os danos resultantes da atividade de mineração afetam tanto as áreas locais quanto a quilômetros de distância, por ter seus efeitos dispersados pela água e pelos ventos (KUMMER *et al.*, 2011).

O crescimento da indústria mineral tem acontecido em grande escala, tanto na quantidade de matéria-prima extraída quanto na abertura de novas minas (FERNANDES; ARAÚJO, 2016). Quando realizada a céu aberto, a atividade de mineração envolve a remoção do material não aproveitado, que é acumulado frequentemente ao lado ou nas proximidades da mina. O resíduo produzido em grande quantidade se torna instável e propenso a deslizamentos e, nos períodos de precipitação, é carregado para locais de relevo mais baixo e para os cursos de água, podendo causar assoreamento, bem como inúmeros outros impactos relacionados (PORTELLA, 2015).

Por outro lado, a necessidade do aumento da produção de alimentos tem levado ao aumento do consumo de fertilizantes na agricultura, especialmente dos minerais sintéticos (de origem não orgânica). A produção e o uso de fertilizantes minerais sintéticos, embora necessários à produção agrícola, impactam negativamente o ambiente. Além disso, as matérias-primas empregadas não são renováveis — portanto, têm prazo determinado para acabarem (SILVA, 2007). Dessa forma, faz-se necessário buscar e pesquisar novas matérias-primas — socioeconômica e ambientalmente sustentáveis — como fonte de nutrientes para as plantas (FARIAS JÚNIOR *et al.*, 2015).

A mineração de vermiculita é uma das mais relevantes do Brasil. As jazidas desse mineral estão localizadas nos estados da Paraíba, Goiás e Piauí, e seu beneficiamento é realizado primeiramente no estado de Goiás, seguido por Piauí, Bahia e Paraíba (UGARTE *et al.*, 2008). No sertão da Paraíba, é uma das atividades que se destaca em termos econômicos. No entanto, é responsável pela geração de resíduos que ficam acumulados nos pátios e que causam impactos ambientais negativos (TRAJANO *et al.*, 2010).

A vermiculita é um alumino silicato hidratado com ferro (Fe) e magnésio (Mg) que faz parte dos flossilicatos, obtida de processos metamórficos, mágnáticos, hidrotermais, diagenéticos e intempéricos (RESENDE *et al.*, 2005). Na caracterização mineralógica do resíduo de vermiculita, identificou-se vermiculita, talco, Mg-hornblenda e hidrobiotita como minerais mais abundantes. Por sua vez, análises químicas realizadas constataram que potássio (K), cálcio (Ca) e Mg foram os nutrientes encontrados em maior proporção, cuja variação foi de: 3,5 a 4,6% de K_2O ; 9,4 a 10,0% de CaO; e 16,1 a 21,0% de MgO (FRANÇA *et al.*, 2010; SOUSA; MACHADO; LEITE, 2011).

O potencial de pó de rochas e minerais silicatados primários como fonte de nutrientes, especialmente de K, tem sido alvo de diversas pesquisas (SILVA *et al.*, 2012; FUJIMURA *et al.*, 2013; LI *et al.*, 2015; MACHADO *et al.*, 2016). Esses trabalhos atestam que esses materiais apresentam alto potencial como fonte de nutrientes. Entretanto, para espécies agrícolas anuais, que apresentam ciclo curto, sua utilização se torna limitada, podendo não atender às necessidades dessas culturas.

Assim, apesar de apresentar elevados teores de nutrientes, a liberação de K, Ca e Mg nos resíduos da mineração de vermiculita é um processo muito lento, tendo em vista que depende do intemperismo químico dos minerais presentes (SOUSA; MACHADO; LEITE, 2011; LI *et al.*, 2015). Dessa forma, quando

esses resíduos são aplicados diretamente no solo como fonte de nutrientes, quase sempre não proporcionam os efeitos desejados (SANTOS *et al.*, 2016).

Para converter minerais primários de baixa solubilidade, como os constituintes dos resíduos de vermiculita, em fontes de nutrientes para as plantas, faz-se necessária a adição de produtos capazes de acelerar o processo de intemperismo químico, por meio da hidrólise desses minerais. Um dos produtos com grande potencial para acelerar esse processo é o enxofre elementar (S⁰), cujo potencial acidificante foi comprovado em vários trabalhos (SOUSA *et al.*, 2012; ARAÚJO *et al.*, 2013; STAMFORD *et al.*, 2015; ARAÚJO *et al.*, 2015). Além do S⁰, a adição de ureia, como fonte de nitrogênio (N) ao resíduo, potencializa o efeito do enxofre (S), tendo em vista que a nitrificação do N da ureia gera acidez, ao mesmo tempo em que o S minimiza a volatilização da ureia, obtendo-se, assim, um fertilizante que é fonte de N, K, Ca, Mg e S para as plantas.

A acidez gerada pela oxidação do S⁰ acelera o processo de liberação dos nutrientes presentes nos minerais que constam no resíduo, mas com menor velocidade em comparação aos fertilizantes comerciais solúveis, a exemplo dos fertilizantes potássicos e nitrogenados. Assim, ao contrário do resíduo de vermiculita adicionado de S⁰, os fertilizantes comerciais, em razão de sua alta solubilidade, geralmente necessitam ser aplicados de forma parcelada para evitar perdas por lixiviação de K e por volatilização de N.

Diante do referido contexto, no presente trabalho, objetivou-se desenvolver um fertilizante mineral de liberação lenta dos macronutrientes nele contidos, utilizando como matéria-prima principal o resíduo da exploração mineral de vermiculita, obtido de mineradora localizada no município de Santa Luzia, Paraíba.

METODOLOGIA

Local de realização do estudo

O estudo foi realizado em casa de vegetação, pertencente ao Centro de Ciência e Tecnologia Agroalimentar (CCTA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), no município de Pombal, Paraíba, a 06° 46' 13" S e 37° 48' 06" W, com altitude de 184 m e temperatura média de 27°C.

Delineamento experimental

Empregou-se o delineamento inteiramente casualizado, em esquema de fatorial 5×8, sendo 5 proporções de S⁰ (0, 50, 100, 150 e 200 g de S⁰ por kg do resíduo) e 8 períodos (0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 e 105 dias) de incubação do produto “fertilizante no solo” ao solo-teste, com 4 repetições, totalizando 160 parcelas experimentais. Cada parcela foi constituída de um vaso com 1,0 dm³ de solo. As doses de S⁰ aplicadas ao solo, junto ao resíduo, foram de 0, 216, 432, 648 e 864 mg de S⁰ por dm³ de solo.

Caracterização do resíduo de vermiculita

O resíduo de vermiculita foi obtido em uma área de descarte próxima à da mineradora União Brasileira de Mineração (UBM), localizada no município de Santa Luzia, Paraíba. Após passar em peneira de 2,0 mm, o resíduo foi analisado quimicamente (Tabela 1), de acordo com os procedimentos descritos em Embrapa (2011) para análise de solo, ou seja: K e sódio (Na) foram extraídos utilizando-se o extrator Mehlich-1; Ca e Mg, com uma solução de KCl 1,0 mol L⁻¹; hidrogênio + alumínio (H+Al), com acetado de cálcio a 0,5 mol L⁻¹, enquanto a

Tabela 1 – Teores de cátions trocáveis e matéria orgânica no resíduo de vermiculita utilizado no experimento.

K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺ +Al ³⁺	MO
cmol _c dm ⁻³					g.kg ⁻¹
0,35	1,54	7,48	30,32	0,0	0,29

K⁺: potássio trocável; Na⁺: sódio trocável; Ca²⁺: cálcio trocável; Mg²⁺: magnésio trocável; H⁺+Al³⁺: hidrogênio + alumínio; MO: matéria orgânica.

matéria orgânica foi determinada pelo método da via úmida ou método Walkley-Black. A caracterização mineralógica do resíduo foi efetuada por difração de raios X (DRX) a partir de uma amostra moída com granulometria de 200 mesh (74 µm). Os difratogramas (Figura 1) gerados foram interpretados com o auxílio do *software* CRYOSYSTEMS (1999) e da literatura (RESENDE *et al.*, 2005).

Material de solo utilizado no experimento

Visando avaliar a capacidade de liberação de nutrientes no solo, utilizaram-se amostras de um solo classificado como luvisso crômico (EMBRAPA, 2013). Esse material foi coletado na camada de 0–20 cm, em área de vegetação do tipo Caatinga hiperxerófila, localizada no município de São Domingos, Paraíba. Após serem secadas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de malha de 2 mm, as amostras de solo foram encaminhadas ao Laboratório de Solos e Nutrição Mineral de Plantas do CCTA/UFPG para sua caracterização química e física, conforme procedimentos descritos em Embrapa (2011).

Foram determinados o pH em CaCl₂ a 0,01 mol L⁻¹, os teores de cálcio trocável (Ca²⁺), magnésio trocável (Mg²⁺), H+Al, sódio trocável (Na⁺), potássio trocável (K⁺), fósforo disponível (P) e matéria orgânica. A caracterização física constou da determinação dos teores de areia, silte e argila, densidade do solo (densidade global) e densidade de partículas (Tabela 2).

Preparo do fertilizante e aplicação ao solo

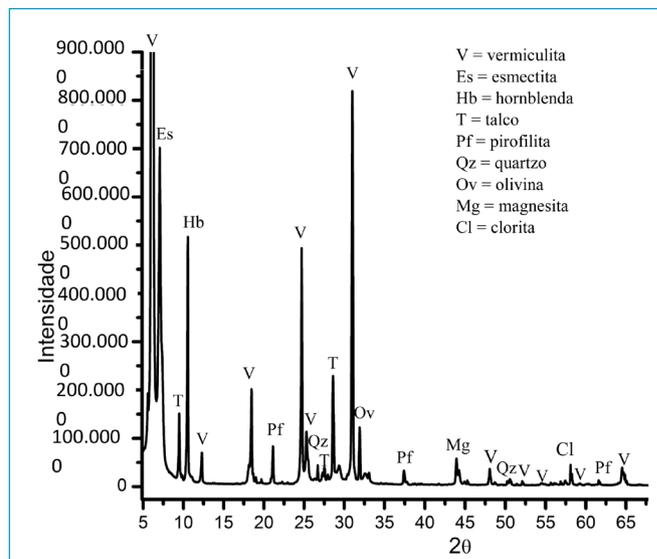
O resíduo de vermiculita foi passado em peneira de 0,2 mm e enriquecido com S^o na forma de reagente p.a (produto analítico) em pó, da marca Vetec[®], com 99% de pureza, nas doses calculadas de acordo com os tratamentos. Em seguida, foi aplicada, ao produto obtido, ureia comercial contendo 45% de N, na dose de 5 g de N/100 g de resíduo e homogeneizado.

Imediatamente após a homogeneização dos componentes do produto “fertilizante”, aplicou-se em 1,0 dm³ de solo do item 4.3 contido em vasos plásticos, 4,33 g/dm³ ou 8,66 t/ha (quando estimada para a camada de 0 a 20 cm) desse homogeneizado. Para a estimativa dessa dose, utilizou-se como referência uma dose de 300 kg de K₂O/ha, considerando um teor total de 3,46% de K₂O no resíduo de vermiculita (MARCELINO, 2019).

Durante os períodos de incubação do produto “fertilizante”, o solo foi mantido com 60% da capacidade de campo. O controle do teor de água do solo foi realizado diariamente mediante pesagem dos vasos por amostragem.

Avaliações no solo-teste

Durante 105 dias, em intervalos de 15 dias, o solo contido nos vasos com os respectivos tratamentos foi homogeneizado, seco ao ar, destorroado, peneirado em peneira de malha de 2 mm e, posteriormente, analisado quanto ao pH e aos teores trocáveis e disponíveis de K, Ca, Mg, Na, P e SO₄⁻², de acordo com as metodologias descritas em Embrapa (2011).

**Figura 1** – Difratograma de raios X do resíduo de vermiculita.**Tabela 2** – Atributos físico-químicos do solo utilizado no experimento.

pH	MO	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺ +Al ³⁺	CTCpot
5,0	8,16	5,4	0,22	0,23	5,4	3,3	1,48	10,63
			cmol _c dm ⁻³					
Areia		Silte	Argila		Densidade de partículas		Densidade do solo	
			g.kg ⁻¹					
			g.cm ⁻³					
636,8		97,2	266,0		2,67		1,40	

pH: potencial hidrogeniônico; MO: matéria orgânica; P: fósforo disponível; K⁺: potássio trocável; Na⁺: sódio trocável; Ca²⁺: cálcio trocável; Mg²⁺: magnésio trocável; H⁺+Al³⁺: hidrogênio + alumínio; CTCpot: capacidade de troca de cátions potencial (a pH 7).

Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste de F e de regressão, ambos ao nível de 5% de significância, utilizando-se o *software* SISVAR (FERREIRA, 2011). Os coeficientes das funções foram testados pelo Teste *t* de Student. Para as variáveis cujos fatores em estudo apresentaram interação significativa, foram ajustadas superfícies de resposta plana ou paraboloide, enquanto para as variáveis que foram influenciadas apenas pelos fatores de forma isolada, foram ajustadas curvas de regressão linear ou quadrática utilizando-se o *software* SigmaPlot 2011.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de pH do solo foram influenciados pelos fatores em estudo apenas de forma isolada (Figuras 2A e 2B). Houve decréscimo do pH do solo ao longo dos períodos de avaliação e, de forma mais acentuada, em função das proporções de S^o aplicadas.

O abaixamento do pH do solo em razão da oxidação do S^o é fundamental para acelerar o processo de liberação de nutrientes do resíduo de mineração em

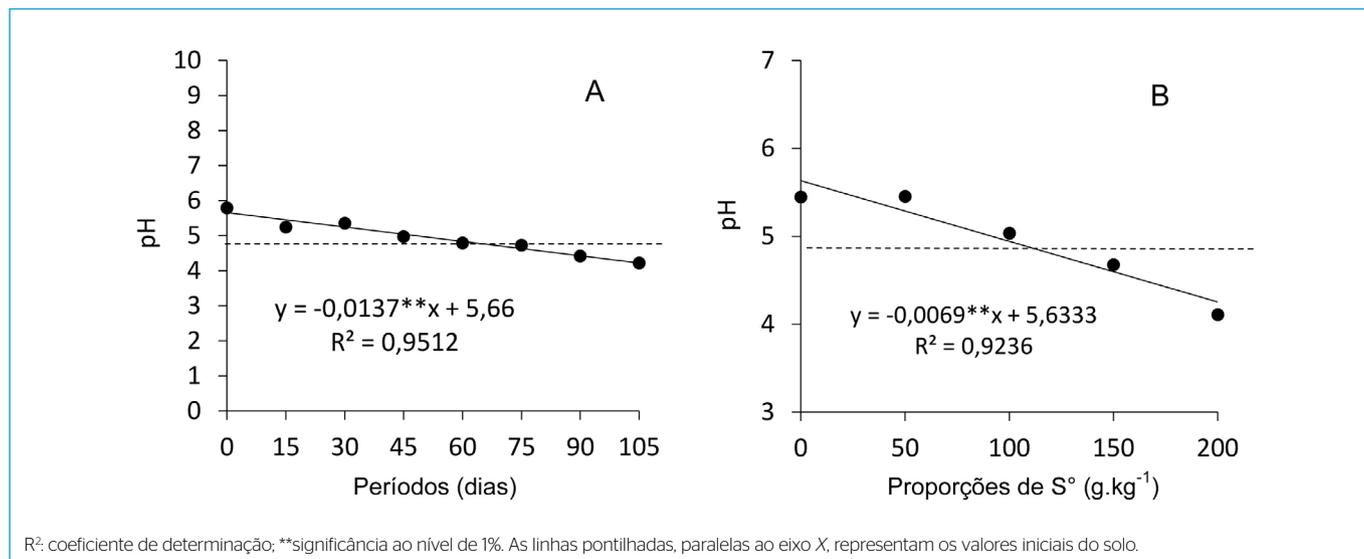


Figura 2 - Valores de pH do solo em função dos períodos de incubação e das proporções de enxofre elementar aplicado ao resíduo de vermiculita.

estudo. Contudo, vale ressaltar que, em valores de pH muito ácido (menor que 5), a maioria das espécies vegetais apresenta dificuldade no seu crescimento e desenvolvimento. Dessa forma, a adição de proporções muito elevadas de S^o no resíduo de mineração pode trazer complicações ao solo em relação à disponibilidade de nutrientes e, principalmente, ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas.

Houve interação significativa entre os fatores períodos de avaliação e proporções de S^o para os teores de sulfato, Ca e Na (Figuras 3, 4 e 5). Os teores de sulfato ajustaram-se ao modelo de superfície de resposta plana (Figura 3), ou seja, houve aumento linear significativo de sulfato com os períodos de avaliação e, especialmente, com as proporções de S^o adicionadas ao solo.

O aumento nos níveis de sulfato do solo em função dos períodos de incubação e das proporções de S^o (Figura 3) explica a diminuição do pH do solo, que ocorreu em razão da oxidação do S^o. Ao ser adicionado ao solo, junto ao fertilizante, o S^o sofre oxidação biológica por bactérias *Acidithiobacillus thiooxidans*, gerando ácido sulfúrico (STAMFORD *et al.*, 2015), fato também observado por Araújo *et al.* (2015) e Araújo *et al.* (2013).

O aumento dos teores de sulfato no solo em função das proporções de S^o ao longo do tempo de incubação indica que não houve restrição ao processo de oxidação de S^o no solo estudado. Nesse sentido, considerando a dose máxima de S^o, 864 mg de S^o.dm⁻³ de solo, nas proporções de 200 g.kg⁻¹ de resíduo, e que o solo apresenta baixíssimos teores de matéria orgânica, estima-se que, no período do estudo, cerca de 46% do S^o foi oxidado.

Destaca-se que a vantagem da adição de S^o ao resíduo de mineração para produzir acidez, e, assim, acelerar a hidrólise dos minerais presentes na sua composição, é que o S^o na forma de sulfato gerado é absorvido pelas plantas, o que se torna fundamental especialmente em solos pobres em matéria orgânica.

Os teores de Ca (Figura 4) ajustaram-se ao modelo de superfície paraboloide, elevando-se de forma significativa em função do aumento do tempo de incubação e das proporções de S^o. Esse fato poderia ser explicado pela acidez gerada pela oxidação do S^o, que aceleraria o processo de intemperismo químico dos minerais adicionados ao solo na forma do resíduo de mineração de

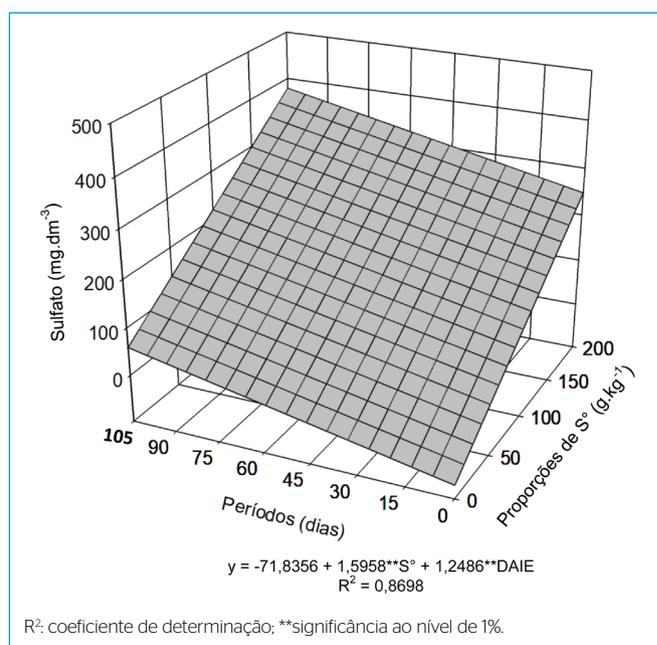


Figura 3 - Concentrações de sulfato no solo em função das proporções de enxofre elementar adicionado a resíduo de vermiculita e do tempo de incubação.

vermiculita e/ou de outros minerais de fácil intemperização oriundos no próprio solo (ARAÚJO *et al.*, 2015).

Em comparação com os teores iniciais no solo (Tabela 2), houve um aumento de 18,5% nos teores trocáveis de Ca na maior proporção de S^o. Em trabalho realizado por Araújo *et al.* (2013), em que foram testadas doses de S^o sobre crescimento inicial de craibeira e os atributos químicos do solo, os autores observaram que a adição de S^o também elevou os teores de Ca no solo.

Para os teores de Mg, não houve influência significativa nem do período de avaliação, (Figura 5A) nem das proporções de S^o (Figura 5B). Já para a

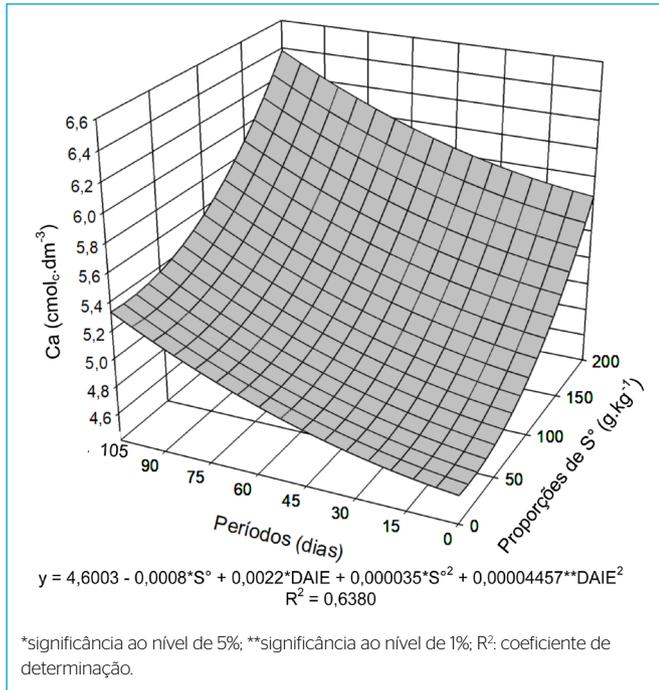


Figura 4 - Concentrações de cálcio no solo em função das proporções de enxofre elementar adicionado a resíduo de vermiculita e do tempo de incubação.

variável Ca+Mg, houve ajuste quadrático, tanto em função dos períodos de avaliação (Figura 5C) quanto para as proporções de S^o (Figura 5D). Tal fato é justificado pelos efeitos dos períodos e das proporções de S^o sobre os teores de Ca. Esses resultados indicam que, embora o resíduo de vermiculita aplicado ao solo tenha em sua composição minerais contendo Mg (Tabela 1), a adição de S^o nas proporções utilizadas na presente pesquisa não foi suficiente para acelerar o processo de liberação desse elemento no solo.

Em comparação com os teores iniciais (Tabela 2), houve um aumento médio de 13,6% nos teores trocáveis de Mg, fato provavelmente associado aos elevados teores trocáveis desse elemento no resíduo (Tabela 1).

Os teores de K⁺ não se alteraram significativamente em função dos períodos de avaliação (Figura 6A). Contudo, ao contrário do que se esperava, houve um leve decréscimo em função do aumento das proporções de S^o (Figura 6B). Uma explicação plausível para esse decréscimo seria possíveis modificações estruturais da vermiculita em função da acidez gerada pelas proporções de S^o, favorecendo, em última instância, a fixação de K nesses minerais (FRANÇA *et al.*, 2010), uma vez que esse mineral apresenta sítios de fixação com elevada especificidade para K (MCBRIDE, 1994).

De acordo com esses resultados, infere-se que a redução do pH do solo para valores em torno de 3,5 a 4,0 não é suficiente para aumentar a liberação de K contido nos minerais presentes no resíduo de mineração estudado. Além do mais, o íon K presente nas micas, mineral do mesmo grupo da vermiculita, tem

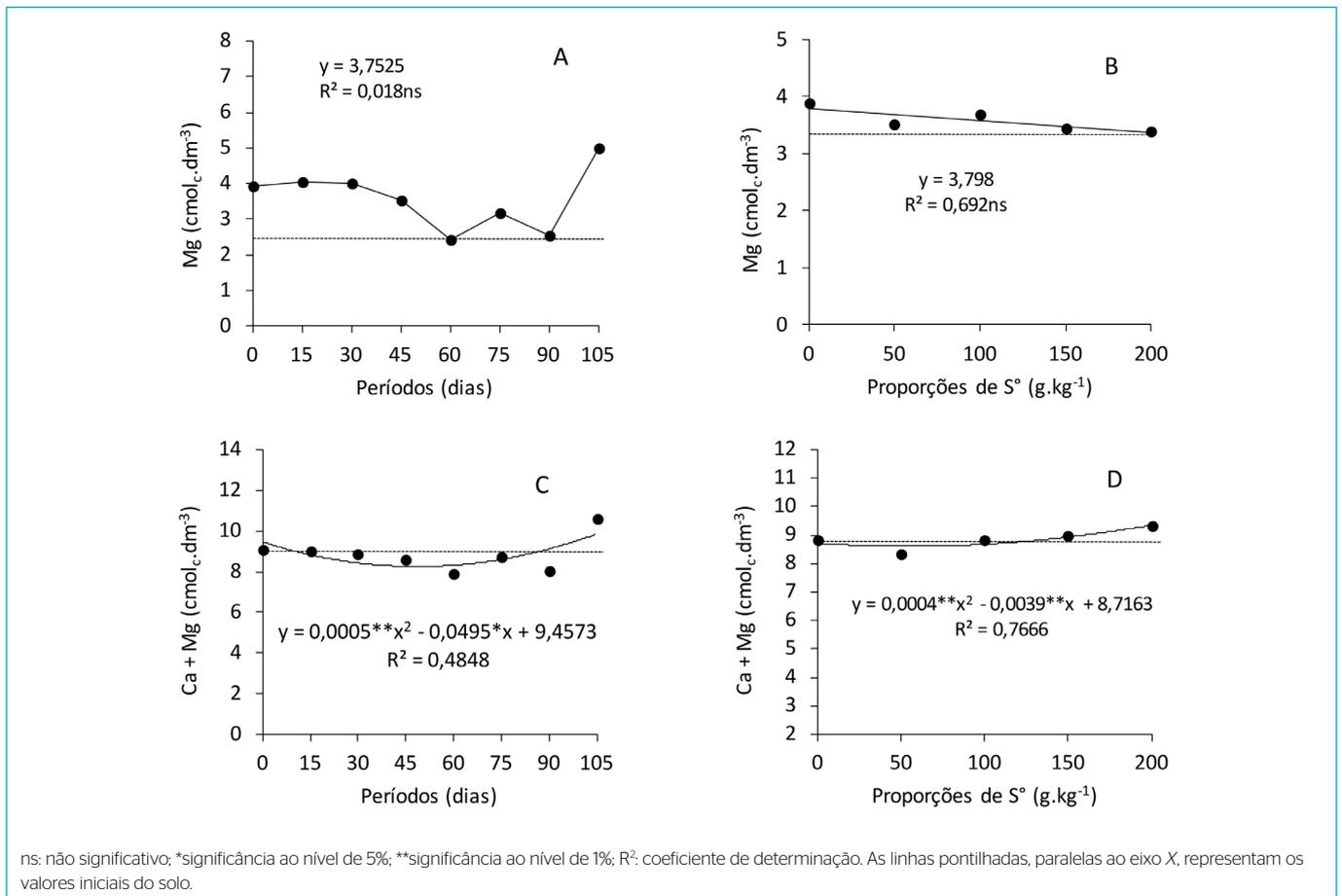
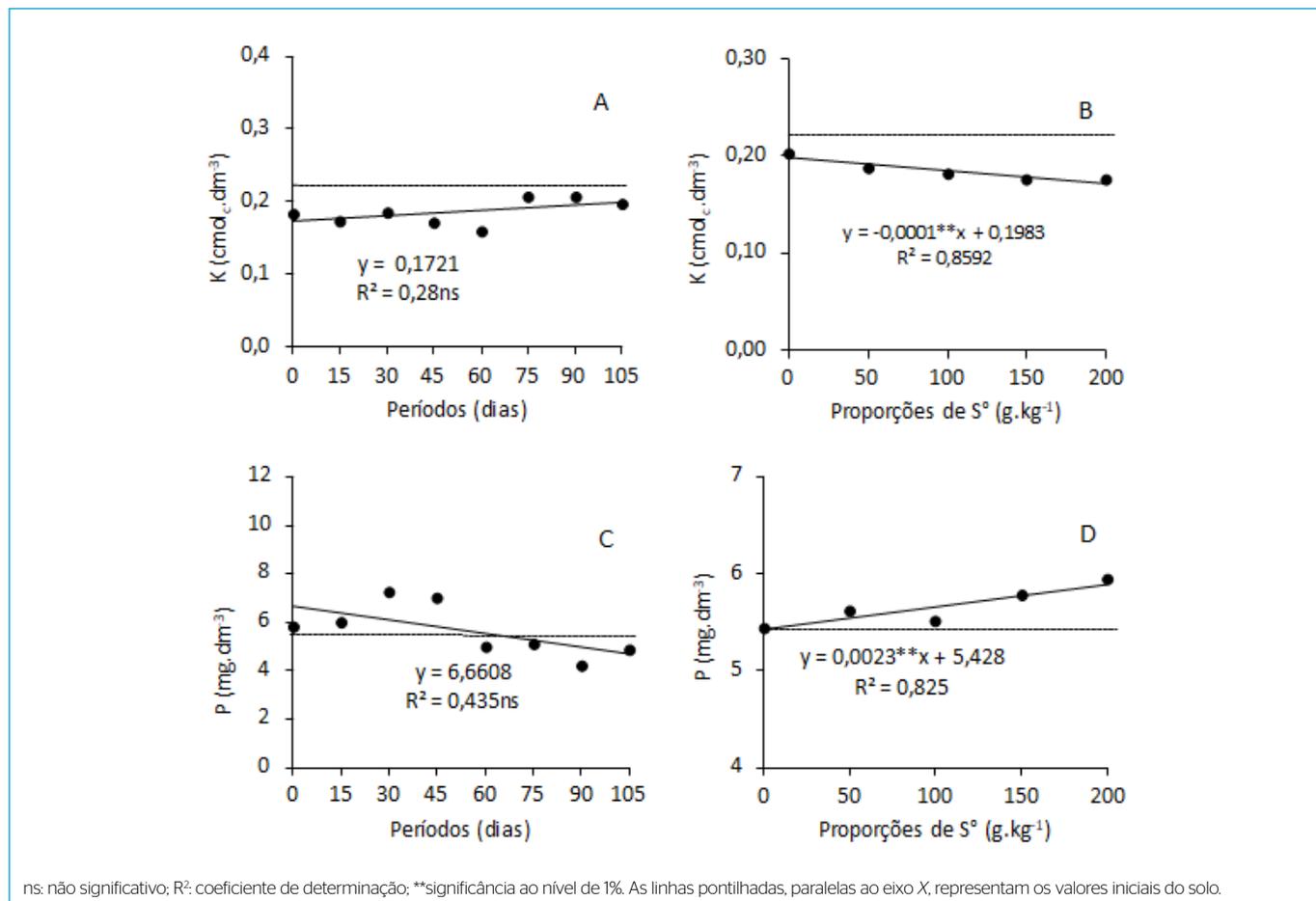


Figura 5 - Concentrações de (A e B) Mg e de (C e D) Ca + Mg no solo em função dos períodos de incubação e das proporções de enxofre elementar aplicado ao resíduo de vermiculita.



ns: não significativo; R²: coeficiente de determinação; **significância ao nível de 1%. As linhas pontilhadas, paralelas ao eixo X, representam os valores iniciais do solo.

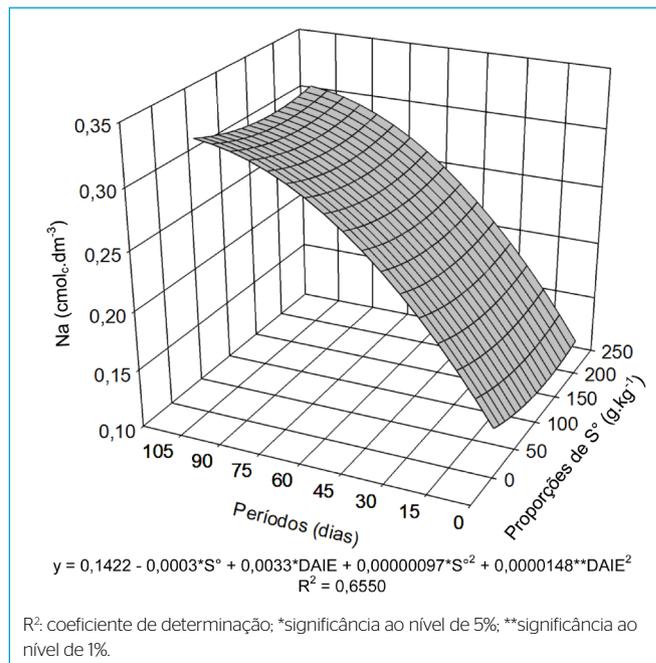
Figura 6 - Concentrações de (A e B) K e de (C e D) P no solo em função dos períodos de incubação e das proporções de enxofre elementar aplicado ao resíduo de vermiculita.

elevada energia de ligação, o que torna o K pouco susceptível a trocas (FRANÇA *et al.*, 2010) e, portanto, de liberação muito lenta, mesmo sob acidez elevada.

Os teores de fósforo não sofreram alteração significativa em função dos períodos de avaliação (Figura 6C). Entretanto, elevaram-se de forma linear em função do aumento das proporções de S⁰ (Figura 6D). Considerando os baixos teores de P normalmente presentes no resíduo de vermiculita (SOUSA; MACHADO; LEITE, 2011), esse fato ocorreu, provavelmente, em razão do aumento dos teores de sulfato no solo, visto que esse ânion compete pelos mesmos sítios de fixação de P no solo, ocasionando menor fixação de P e, conseqüentemente, aumento nos teores de P disponível (FRANDOLOSO *et al.*, 2010). Adicionalmente, é possível que a acidificação do solo pelo S⁰ tenha aumentado a solubilidade de fosfatos fixados como fosfatos de cálcio no solo (HASHEMIMAJD; FARANI; JAMAATI-E-SOMARINI, 2012).

Em relação ao P, ressalta-se que, embora tenha havido efeito significativo para as proporções de S⁰, o aumento observado é muito pequeno em relação às necessidades das plantas e provavelmente não produziria qualquer efeito prático sobre a nutrição fosfatada das plantas.

Os teores de Na⁺ (Figura 7), por sua vez, elevaram-se de forma significativa em função dos períodos de avaliação; entretanto, não foram influenciados pelas proporções de S⁰. Esse fato provavelmente se deve à alta solubilidade do Na nos minerais, em comparação com outros cátions como Ca, K e Mg (MCBRIDE,



R²: coeficiente de determinação; *significância ao nível de 5%; **significância ao nível de 1%.

Figura 7 - Concentrações de sódio no solo em função das proporções de enxofre elementar adicionado a resíduo de vermiculita e do tempo de incubação.

1994). Assim, tanto a acidez gerada pela nitrificação do N-ureia quanto a acidez gerada no processo de oxidação biológica do S^o, poderia explicar a liberação desse elemento ao longo dos períodos de incubação.

Cabe ressaltar que, apesar de a liberação de Na não ter sido demasiadamente elevada, o acúmulo desse elemento no solo é indesejável, tendo em vista que quando a relação desse elemento na capacidade de troca de cátions (CTC) do solo é superior a 15%, diversos problemas físicos e químicos no solo podem surgir (ARAÚJO *et al.*, 2013), a exemplo da diminuição da porosidade e do movimento de água e toxicidade às plantas. Ressalta-se, entretanto, em solos sem problemas de drenagem, que o Na é facilmente lixiviado do solo, tendo em vista que é o cátion mais fracamente retido no solo em razão de seu elevado raio hidratado (MCBRIDE, 1994).

De maneira geral, esses resultados indicam que as adições de S^o no resíduo de mineração nas proporções testadas nesta pesquisa podem favorecer o aumento dos teores de Ca no solo. Entretanto, esse processo, provavelmente, não deve ocorrer para nutrientes como K e Mg, que se encontram na estrutura cristalina dos minerais presentes no resíduo de vermiculita, em razão da necessidade de um período de incubação maior que o utilizado no presente trabalho.

Adicionalmente, é válido mencionar que o aumento dos teores de Ca obtidos com as proporções de S^o possivelmente não foi originado exclusivamente dos minerais oriundos do resíduo de mineração, mas também daqueles do próprio solo e de mais fácil solubilização do que aqueles presentes no resíduo de vermiculita. Contudo, a confirmação dessa hipótese só seria possível com a execução de outro experimento com o mesmo número de parcelas,

ou seja, avaliação do solo recebendo apenas as doses de S^o correspondentes àquelas aplicadas pelas proporções desse produto no solo. Entretanto, esse outro experimento não foi realizado em razão das limitações de infraestrutura e financeira da pesquisa.

CONCLUSÕES

O resíduo de mineração associado ao S^o proporcionou aumento nos teores de sulfato, Ca e P disponível e diminuição do pH do solo. Os teores de Mg, por sua vez, não foram elevados com a aplicação do resíduo associado ao S^o.

A aplicação do resíduo de mineração de vermiculita associado a S^o visando incrementar os teores de Ca, K e Mg em luvisolos não é recomendada, uma vez que pode haver diminuição dos teores de K⁺, enquanto os teores de Ca e Mg no solo são pouco alterados.

Houve elevação nos teores de Na⁺ no solo com a aplicação do “fertilizante”, o que pode se constituir em fator limitante para seu uso de forma frequente em solos com drenagem deficiente em razão do excessivo acúmulo de Na.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Silva, R.M.G.: Curadoria de Dados, Análise Formal, Escrita – Primeira Redação. Rocha, J.L.A.: Conceituação, Análise Formal, Escrita – Revisão e Edição. Dias, V.B.: Curadoria de Dados, Análise Formal, Escrita – Revisão e Edição. Costa, R.C.: Análise Formal. Santos, E.N.: Curadoria de Dados, Análise Formal, Escrita – Revisão e Edição.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J.L. *et al.* Crescimento inicial de crabeira em solo salinizado corrigido com enxofre elementar. *Irriga*, v. 18, n. 4, p. 647-660, 2013. <https://doi.org/10.15809/irriga.2013v18n4p647>
- ARAÚJO, J.L. *et al.* Enxofre elementar ou sulfato de cálcio para remediação de solos salino-sódicos? *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 45, n. 4, p. 388-396, 2015. <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4537090>
- CRYOSYSTEMS, O. Crystallographica Search-Match. *Journal of Applied Crystallography*, v. 32, n. 2, p. 379-380, 1999. <https://doi.org/10.1107/S0021889899004124>
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2011. 225 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Sistema brasileiro de classificação do solo*. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2013. 20 p.
- FARIAS JÚNIOR, J.A. *et al.* Clonagem de *Cnidocolus quercifolius* por alporquia, utilizando rejeito de vermiculita e diferentes concentrações de AIA. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 35, n. 81, p. 35-40, 2015. <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.81.499>
- FERNANDES, F.R.C.; ARAÚJO, E.R. Mineração no Brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais. *In: GUIMARÃES, P.E.; CEBADA, J.D.P.* (org.). *Conflitos ambientais na indústria mineira e metalúrgica*. Rio de Janeiro: CETEM/CICP, 2016. p. 65-88.
- FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência Agrotecnologia*, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>
- FRANÇA, S.C.A. *et al.* Estudo da aplicação de resíduos de vermiculita como fertilizante alternativo de potássio. Anais. 2010. *In: II SIMPÓSIO DE MINERAIS INDUSTRIAIS DO NORDESTE*, 2., 2010. *Anais [...]*. Campina Grande, 2010.
- FRANDELOSO, J.F. *et al.* Eficiência de adubos fosfatados associados ao enxofre elementar na cultura do milho. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 57, n. 5, p. 686-694, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000500019>
- FUJIMURA, S. *et al.* Effects of applying potassium, zeolite and vermiculite on the radiocesium uptake by rice plants grown in paddy field soils collected from fukushima prefecture. *Plant Production Science*, v. 16, n. 2, p. 166-170, 2013. <https://doi.org/10.1626/pp.16.166>
- HASHEMIMAJD, K.; FARANI, T.M.; JAMAATI-E-SOMARINI, S. Effect of elemental sulphur and composto on pH, electrical conductivity and phosphorus availability of one clay soil. *African Journal of Biotechnology*, v. 11, n. 6, p. 1425-1432, 2012. <https://doi.org/10.5897/AJB11.2800>

- KUMMER, L. et al. Extrações sequenciais de chumbo e zinco em solos de área de mineração e metalúrgica de metais pesados. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 35, n. 6, p. 2005-2018, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600017>
- LI, T. et al. Exploring the potential of phyllosilicate minerals as potassium fertilizers using sodium tetraphenylboron and intensive cropping with perennial ryegrass. *Scientific Reports*, v. 5, p. 1-7, 2015. <https://doi.org/10.1038/srep09249>
- MACHADO, R.V. et al. Characterization of Ornamental Rock Residue and Potassium Liberation Via Organic Acid Application. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 40, e0150153, 2016. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150153>
- MARCELINO, R.M. *Potencial de resíduo de mineração de vermiculita associado a enxofre elementar como fonte de nutrientes em solo salino-sódico*. 34f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2019.
- MCBRIDE, M.B. *Environmental chemistry of soils*. Nova York: Oxford University Press, 1994. 406 p.
- PORTELLA, M.O. Efeitos colaterais da mineração no meio ambiente. *Revista Brasileira de Políticas Públicas*, v. 5, n. 3, p. 264-276, 2015. <https://doi.org/10.5102/rbpp.v5i3.3410>
- RESENDE, M. et al. *Mineralogia de solos brasileiros: interpretação e aplicações*. Lavras: Editora UFLA, 2005. 192 p.
- SANTOS, W.O. et al. Production and evaluation of potassium fertilizers from silicate rock. *Journal of Plant nutrition and Soil Science*, v. 179, n. 4, p. 547-556, 2016. <https://doi.org/10.1002/jpln.201500484>
- SILVA, D.R.G. et al. Characterization and nutrient release from silicate rocks and influence on chemical changes in soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 3, p. 951-962, 2012. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832012000300025>
- SILVA, J.P.S. Impactos ambientais causados por mineração. *Revista Espaço da Sophia*, v. 1, 2007.
- SOUSA, F.Q. et al. Crescimento e respostas fisiológicas de espécies arbóreas em solo salinizado tratado com corretivos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 16, n. 2, p. 173-181, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000200007>
- SOUSA, L.D.A.; MACHADO, A.O.D.V.; LEITE, J.Y.P. Liberação de potássio a partir de rejeito de vermiculita. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 24., 2011, Salvador. *Anais [...]*. Salvador, 2011.
- STAMFORD, N.P. et al. Effect of gypsum and sulfúur with *Acidithiobacillus* on soil salinity alleviation and on cowpea biomass and nutrient status as affected by PK rock biofertilizer. *Scientia Horticulturae*, Amsterdã, v. 192, p. 287-292, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.06.008>
- TRAJANO, E.V.A. et al. Crescimento do pinhão manso em substratos com resíduos de mineração do semiárido-PB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 4.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE OLEAGINOSAS ENERGÉTICAS, 1., 2010, João Pessoa. *Inclusão social e energia: anais*. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2010.
- UGARTE, J.F.O.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. *Vermiculita*. CETEM/MCTI, 2008.