

SILMARA COSTA SILVA

**REVEGETAÇÃO DE ÁREAS DE MINERAÇÃO COM PRESENÇA DE  
SUBSTRATOS SULFETADOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S586r  
2013

Silva, Silmara Costa, 1988-  
Revegetação de áreas de mineração com presença de  
substratos sulfetados / Silmara Costa Silva. – Viçosa, MG,  
2013.  
ix, 88 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Luiz Eduardo Dias.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 79 - 86.

1. Sulfetos. 2. Drenagem ácida de minas. 3. Revegetação.  
4. Áreas degradadas - Recuperação. I. Universidade Federal de  
Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação  
em Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 631.41

SILMARA COSTA SILVA

**REVEGETAÇÃO DE ÁREAS DE MINERAÇÃO COM PRESENÇA DE  
SUBSTRATOS SULFETADOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 22 de março de 2013.

---

Walter Antônio Pereira Abrahão

---

Roberto Francisco de Azevedo

---

Igor Rodrigues de Assis  
(Coorientador)

---

Luiz Eduardo Dias  
(Orientador)

*Ao meu pai Didico*

*À minha mãe Fatinha*

*Às minhas irmãs Soraia e Carol*

*À minha família e amigos*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre iluminando meu caminho.

À minha família, pela confiança e por estar sempre me incentivando a seguir em frente.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos pela oportunidade de curso concedida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado.

Ao professor Luiz Eduardo Dias, pela orientação, paciência, confiança, atenção e disponibilidade.

Ao professor Igor Assis, que desde 2008 contribui para a minha formação, agradeço pela amizade, paciência, apoio, pela fundamental colaboração nos trabalhos de campo e por estar sempre disposto a ajudar da melhor forma possível.

Aos funcionários do Departamento de Solos pela ajuda na realização dos trabalhos e amizade.

Aos amigos Luiz Rogério Rezende e Renato Veloso pela enorme colaboração nos trabalhos de campo.

À Fabiana Barros e Indyra Carvalho, pela ajuda fundamental na realização deste trabalho e pela amizade. À Amanda, Mateus, João, Carlos Henriques, Fabrício e ao Autieres pela colaboração na realização de algumas etapas deste trabalho.

Aos amigos do DPS, em especial Luiz dos Santos Jr., Luísa Poyares, Alôncio Pietralonga e Frederico Paes, pelo apoio e companhia em todas as horas. Aos demais amigos pelo carinho e incentivo.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

SILMARA COSTA SILVA, filha de Raimundo Ferreira da Silva e Maria de Fátima Costa da Silva, nasceu em 23 de maio de 1988, na cidade de Itabira, Minas Gerais.

Em 2006, iniciou o curso de Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, graduando-se em janeiro de 2011. Foi bolsista de iniciação científica no Departamento de Solos da mesma universidade entre agosto de 2009 e julho de 2010.

Em agosto de 2011, iniciou o curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em março de 2013. Em abril de 2013 iniciou o curso de doutorado pelo mesmo programa.

## RESUMO

SILVA, Silmara Costa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2013.  
**Revegetação de Áreas de Mineração com Presença de Substratos Sulfetados.**  
Orientador: Luiz Eduardo Dias. Coorientador: Igor Rodrigues de Assis.

A constante preocupação com a contaminação de áreas de exploração mineral e a pressão por parte da sociedade e de órgãos ambientais promove a busca por técnicas eficientes de recuperação ambiental destes locais. A extração de determinados minerais como ouro pode estar associada à geração de drenagem ácida, promovendo a contaminação de áreas adjacentes, sendo necessários planos de recuperação mais complexos e de elevado custo. Além disso, é marcante a ocorrência de mobilização de metais pesados e metaloides, como arsênio (As) decorrentes da drenagem ácida. Uma vez que as técnicas de recuperação de áreas degradadas pela mineração normalmente estão relacionadas à revegetação, este trabalho teve como objetivo avaliar diferentes materiais e formas de cobertura de substrato sulfetado remanescente de exploração de ouro com a finalidade de fornecer condições para o estabelecimento e crescimento de vegetação. O experimento foi instalado em campo com treze tratamentos, em esquema fatorial  $(1 \times 1 \times 1) + (2 \times 3 \times 2)$ , com um modelo de três camadas acima do substrato sulfetado pouco intemperizado (B2). A primeira, denominada camada de quebra de capilaridade (CQC), que possui a função de evitar a ascensão de água por capilaridade, foi constituída por brita calcária ou laterita. A segunda, denominada camada selante (CS), que possui a função de minimizar a drenagem de água e o fluxo de gases, quando presente, foi constituída por solo (horizontes A e B de um Latossolo vermelho amarelo – LVA) ou substrato sulfetado muito intemperizado (B1). A última camada, denominada camada de cobertura (CC), cuja função é dar suporte ao crescimento das plantas, foi constituída de solo ou B1. As espécies utilizadas para a revegetação foram *Melinis minutiflora* P. Beauv (capim gordura), *Stizolobium aterrimum* Piper & Tracy (mucuna preta), *Lolium multiflorum* Lam. (azevém), *Crotalaria spectabilis* Roth. (crotalária) e *Stylosanthes spp.* – *Stylosanthes capitata* Vogel e *S. macrocephala* M. B. Ferr. et S. Costa (estilosante). Realizou-se a caracterização química, física e mineralógica dos diferentes materiais aos cinco meses após o plantio; e avaliação da atividade microbiana e matéria orgânica do solo (MOS) dez e treze meses após o plantio. Foram avaliadas também matéria seca produzida e teores

foliares de As por tratamento. O solo apresenta textura muito argilosa (72 % de argila), enquanto o substrato B1 possui textura franco siltosa (65 % de silte). A umidade dos materiais na CC foi em média de 0,11 kg kg<sup>-1</sup> para o solo e 0,03 kg kg<sup>-1</sup> para o substrato B1 (período seco), e de 0,30 kg kg<sup>-1</sup> para o solo e 0,06 kg kg<sup>-1</sup> para o B1 (período chuvoso). Após treze meses, tratamentos que apresentavam laterita na CQC produziram em média 0,98 t ha<sup>-1</sup> (p < 0,01) a mais de material vegetal do que os tratamentos que continham brita calcária, e os teores foliares médios de As nos tratamentos com brita calcária na CQC apresentaram 6,12 mg kg<sup>-1</sup> (p < 0,05) a mais do que naqueles que possuíam lateria na CQC. A diferença da biomassa produzida para os tratamentos com solo ou B1 na CS foi significativa apenas para tratamentos com brita calcária na CQC. Tratamentos que possuíam solo na CS produziram em média 5,16 t ha<sup>-1</sup> (p < 0,01) a mais de biomassa do que aqueles que possuíam B1 na CS. A média dos teores disponíveis de arsênio para o solo foi significativamente menor do que para o substrato B1. Sendo assim, a presença de solo na CC ocasionou produção de biomassa significativamente maior do que nos tratamentos com B1 naquela camada. O carbono na biomassa microbiana (BMS-C) foi significativamente maior nas parcelas que receberam solo na CC em relação ao B1. O quociente microbiano (qCO<sub>2</sub>), relação entre a quantidade de CO<sub>2</sub> produzido por unidade de carbono da biomassa microbiana por unidade de tempo, apresentou valores altos, sendo estes relativamente maiores para o B1. Dentre as espécies utilizadas, o capim gordura e a crotalária se mostraram mais tolerantes às condições do B1 e o azevém não se estabeleceu neste material. O uso de solo como constituinte da camada selante e da camada de cobertura resultou em melhores condições para o estabelecimento das plantas. No entanto, dependendo da combinação das camadas, é possível a utilização de B1 nas CS e CC, exercendo menor pressão sobre o uso dos solos de outras áreas, representando assim, considerável redução de custo de recuperação da área.



## ABSTRACT

SILVA, Silmara Costa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2013. **Revegetation of Mining Areas with Presence of Sulphide Substrates.** Adviser: Luiz Eduardo Dias. Co-adviser: Igor Rodrigues de Assis.

The constant concern about the contamination of mineral exploration areas and pressure from society and environmental agencies promotes the search for efficient techniques for environmental remediation of these sites. The extraction of certain minerals such as gold may be associated with the generation of acid mine drainage, promoting the contamination of adjacent areas, than recovery plans more complex and costly are necessary. Moreover, it is notable the occurrence of mobilizing heavy metals and metalloids such as arsenic (As) resulting from acid mine drainage. Since the techniques of reclamation of mining are usually related to revegetation, this study aimed to evaluate different materials and cover forms of gold exploration sulfide substrate remaining in order to provide conditions for the establishment and growth of vegetation. The experiment was conducted in field with thirteen treatments in a factorial (1 x 1 x 1) + (2 x 3 x 2), with a model of three layers above the sulfide substrate slightly weathered (B2). The first, called capillary breaking layer (CQC), which has the function of preventing the rise of water by capillarity, was composed of crushed limestone or laterite. The second, called sealant layer (CS), which has the function of minimizing the drainage of water and the gas stream, when present, consisted of soil (A and B horizons of an Oxisol – LVA) or very weathered sulphide substrate (B1). The last layer, called coverage layer (CC), whose function is to support the growth of plants, consisted of soil or B1. The species used for revegetation were *Melinis minutiflora* P. Beauv (fat grass), *Stizolobium aterrimum* Piper & Tracy (velvet bean), *Lolium multiflorum* Lam (ryegrass), *Crotalaria spectabilis* Roth. (crotalaria) and *Stylosanthes* spp. – *Stylosanthes capitata* Vogel and *S. macrocephala* M. B. Ferr. et S. Costa (estilosante). It was analyzed the chemical, physical and mineralogical characteristics of these materials five months after planting, and evaluation of microbial activity and soil organic matter (MOS) ten and thirteen months after planting. We also evaluated the dry biomass and foliar contents of arsenic per treatment. The soil is very clayey (72 % clay), while the substrate B1 has silty loam texture (65 % silt). The moisture of the materials in CC averaged 0.11 kg kg<sup>-1</sup> for soil and

0.03 kg kg<sup>-1</sup> for substrate B1 (dry season), and 0.30 kg kg<sup>-1</sup> for soil and 0.06 kg kg<sup>-1</sup> for B1 (rainy season). After thirteen months, treatments that had the laterite CQC produced on average 0.98 t ha<sup>-1</sup> (p < 0.01) more plant material than treatments containing crushed limestone, and foliar contents of As average in this treatment presented 6.12 mg kg<sup>-1</sup> (p < 0.05) more than those which had laterite in CQC. The difference of biomass produced for treatments with soil or B1 in CS was significant only for treatments with crushed limestone in CQC. Treatments that had soil in CS produced on average 5.16 t ha<sup>-1</sup> (p < 0.01) more biomass than those with B1 in CS. The average arsenic concentration available to the soil was significantly lower than that of the substrate B1. Thus, the presence of soil in CC caused the biomass significantly higher than in treatments with B1. The microbial biomass carbon (BMS-C) was significantly higher in the plots that received land in CC relative to B1, indicating lower environmental sustainability when the latter material is used as cover. The microbial quotient (qCO<sub>2</sub>), a relation between the amounts of CO<sub>2</sub> generated per unit of microbial biomass per unit of time, showed high values, which are relatively higher for B1. Among the species used, the fat grass and crotalaria were more tolerant to B1 conditions and ryegrass was not established in this material. The use of soil as a constituent of the sealant layer and the cover layer resulted in better conditions for plant establishment. However, depending on the combination of layers, it is possible to use B1 in CC and CS, exerting less pressure on the use of soils in other areas, thus representing a considerable cost reduction of recovery area.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	1
CAPÍTULO 1 .....	3
<i>Recuperação Ambiental de Áreas com Drenagem Ácida</i> .....	3
1.1. Exploração mineral em materiais sulfetados .....	4
1.2. Drenagem ácida de mina .....	4
1.3. Mitigação da drenagem ácida .....	5
1.4. Revegetação de substrato sulfetado .....	8
1.5. Atividade microbiana do solo .....	11
1.6. Considerações finais .....	15
CAPÍTULO 2 .....	16
<i>Características físicas, químicas e mineralógicas de diferentes materiais de cobertura de substrato sulfetado</i> .....	16
2.1. INTRODUÇÃO .....	17
2.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	18
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	27
2.3.1. Camada de cobertura .....	27
2.3.2. Camada Selante .....	43
2.1. CONCLUSÃO .....	47
CAPÍTULO 3 .....	48
<i>Atividade microbiana, biomassa vegetal e teores foliares em diferentes formas de cobertura do substrato sulfetado</i> .....	48
3.1. INTRODUÇÃO .....	49
3.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	50
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	59
3.3.1. Atividade microbiana .....	59
3.3.2. Teores foliares .....	65
3.3.3. Biomassa vegetal .....	70
3.3.4. Avaliação das espécies utilizadas .....	76

3.4. CONCLUSÃO.....	77
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
LITERATURA CITADA.....	79
ANEXO.....	87

## INTRODUÇÃO GERAL

O estado de Minas Gerais, por possuir muitas reservas minerais, está sujeito à atividade de extração de diversos minerais. Por ser uma atividade geradora de grande impacto ambiental, é passível de pressão por parte da sociedade e de órgãos ambientais para que se promova, no menor tempo possível, a recuperação das áreas degradadas pela exploração.

Dentre os minérios produzidos no estado, maior destaque é dado para o minério de ferro, concentrado de chumbo, de zinco e de nióbio. Além destes, é produzido também manganês, bauxita, níquel, silício e ouro.

As reservas mundiais de ouro foram estimadas em 51 mil toneladas em 2010, sendo o Brasil responsável por 2,4 mil toneladas, ocupando a posição de sexta maior reserva. Deste total, 42 % encontram-se no estado do Pará, 37 % em Minas Gerais, 7 % em Goiás, 6 % na Bahia, 4 % em Mato Grosso, e o restante distribuído entre os outros estados (SEDE, 2012).

Apesar da maior reserva encontrar-se no estado do Pará, a maior produção de ouro no Brasil encontra-se no estado de Minas Gerais, e representou 56,8 % da produção brasileira no ano de 2011 (DNPM, 2012), ano no qual o Brasil passou a ocupar a 13ª posição da produção mundial, com 65 toneladas de ouro produzidas.

A maior mina a céu aberto de produção de ouro em operação no Brasil encontra-se na cidade de Paracatu, MG. Apesar de apresentar o menor teor aurífero do mundo ( $0,459 \text{ g t}^{-1}$ ), em 2010 foi responsável por 29 % da produção brasileira (IBRAM, 2011).

A retirada da camada superficial do solo e a escavação do subsolo pela mineração deixam expostos materiais que não favorecem o estabelecimento e crescimento de vegetação. Sendo assim, tornam-se necessárias intervenções que contribuam com a regeneração desses ambientes por meio de melhorias do substrato.

Quando se trata de áreas contaminadas por elementos tóxicos, a retirada da cobertura vegetal agrava a degradação do solo, promovendo a lixiviação destes elementos para o lençol freático ou contaminando outras áreas. Em determinadas regiões produtoras de ouro, como em Paracatu, o minério encontra-se associado a minerais sulfetados como

a pirita e a arsenopirita. Estes minerais, quando oxidados podem solubilizar metais e elementos como arsênio, que apresenta grande toxicidade às plantas e ao ser humano. Neste sentido, técnicas que visem à imobilização deste elemento na área explorada devem ser utilizadas.

A recuperação de áreas degradadas pela mineração normalmente está relacionada a atividades que visem o restabelecimento da vegetação. Em se tratando de substratos sulfetados, a revegetação é um desafio. Este processo é complexo, uma vez que as condições que favorecem o desenvolvimento do sistema radicular geralmente estimulam a oxidação e a geração de drenagem ácida e, por outro lado, as condições que promovem a redução da geração de águas ácidas, não são ideais para o crescimento das plantas (MELLO *et al.*, 2003).

Dessa forma, camadas de cobertura com diferentes materiais sobre o substrato remanescente da lavra são utilizadas em todo o mundo com o objetivo de favorecer tanto o desenvolvimento da vegetação quanto a mitigação da drenagem ácida. Tem-se utilizado em diversos trabalhos camadas selantes, compostas em sua maioria por material argiloso compactado, e camadas de cobertura com características que promovam melhores condições de estabelecimento da vegetação (DIAS *et al.*, 2008; ASSIS *et al.*, 2012; ASSIS *et al.*, 2011; TORDOFF *et al.*, 2000; SUNDBLAD, 2003). A utilização destas camadas tem o objetivo de evitar a ascensão capilar de elementos tóxicos e a lixiviação dos mesmos, que pode levar à contaminação do lençol freático, além de promover melhores condições para o estabelecimento da vegetação.

Visando melhorar as condições dos substratos com a utilização das camadas citadas anteriormente, propõe-se a utilização de uma terceira camada entre o substrato e as camadas selante e de cobertura. Esta camada é composta por material grosseiro e tem a finalidade de inibir a ascensão capilar de elementos tóxicos solubilizados com a drenagem ácida e criar um gradiente de umidade entre a camada selante e o material sulfetado, reduzindo, dessa forma, sua oxidação.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar diferentes formas e materiais de cobertura de substrato sulfetado remanescente de exploração de ouro, com a finalidade de fornecer condições para o estabelecimento e crescimento de vegetação.

## **CAPÍTULO 1**

### ***Recuperação Ambiental de Áreas com Drenagem Ácida***

### **1.1. Exploração mineral em materiais sulfetados**

Minerais sulfetados, encontrados naturalmente na crosta terrestre, normalmente não representam risco ambiental, quando em condições naturais. No entanto, a exposição destes materiais às condições atmosféricas, por ações antrópicas ou não, pode ocasionar sérios problemas ambientais. A presença destes compostos em solos tiomórficos ou associados ao carvão mineral e a minérios como o de níquel, chumbo, zinco, cobre, urânio, ouro e prata, pode provocar a drenagem ácida, um problema de cunho ambiental de largas proporções que também pode ocorrer em áreas de empréstimo e cortes de estrada onde há exposição de sulfetos (MELLO *et al.*, 2003).

A atividade mineradora em áreas que contêm minerais sulfetados, como pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e arsenopirita ( $\text{FeSAs}$ ), pode expor à atmosfera os sulfetos confinados que, ao entrarem em contato com a água e ar, sofrem oxidação catalisada por bactérias, principalmente espécies do gênero *Acidithiobacillus* (*A. ferrooxidans*, *A. thioparus* e *A. thiooxidans*) (BLOWES *et al.*, 1998). Os produtos da oxidação dos sulfetos, além de serem altamente solúveis, apresentam reação fortemente ácida, de modo que são facilmente dissolvidos na fase líquida, acidificando as águas de drenagem (MELLO & ABRAHÃO, 1998). Em razão dos baixos valores de pH (que podem chegar a 2,0 ou menos), elementos tóxicos, incluindo Al, Mn, Cu, As, Zn, Pb, Hg e Cd, se presentes no meio, são solubilizados e mobilizados nas águas de drenagem, podendo ser absorvidos em níveis tóxicos pelas plantas e incorporados na cadeia trófica (MELLO & ABRAHÃO, 1998; SHU *et al.*, 2001).

A presença de arsênio em áreas de mineração de ouro pode ser explicada pela incorporação do ouro na rede cristalina, tanto na solução do sólido quanto nas faces de crescimento do cristal de minérios compostos de arsênio formados em alta temperatura. Sendo assim, o arsênio é visto na maioria das vezes como um indicador quando métodos geoquímicos de prospecção são utilizados para identificar depósitos minerais, na maioria das vezes de ouro e prata (ALLOWAY, 1995).

### **1.2. Drenagem ácida de mina**

Segundo Evangelou (1995), designa-se drenagem ácida o processo no qual as águas que são drenadas de material sulfetado, ao dissolverem os sais produzidos pela oxidação deste tornam-se ácidas e com altas concentrações de sulfato e ferro. É resultante



de um processo que envolve tanto reações produtoras de acidez, pela oxidação dos sulfetos, quanto reações de dissolução de certos minerais, principalmente carbonatos, capazes de produzirem alcalinidade.

O processo de geração de drenagem ácida, segundo Santana Filho (2005), decorre de um conjunto de reações químicas, eletroquímicas e microbiológicas, que são desencadeadas a partir da exposição de corpos geológicos com presença de sulfetos ao oxigênio e à umidade. Como consequência, verifica-se uma série de fatores, podendo-se destacar a produção de ácido sulfúrico, a queda de pH e o aumento da solubilidade e do risco de lixiviação de metais pesados.

Os bissulfetos de ferro são os principais geradores da drenagem ácida. Segundo Monteiro (1980), os sulfetos de Fe (pirita e marcassita) são os minerais mais abundantes e ocorrem em uma vasta gama de condições geológicas.

A drenagem ácida, portanto, constitui sério problema ambiental, capaz de comprometer a qualidade dos recursos hídricos e a eficiência das técnicas de revegetação de áreas de rejeito e de estéril oriundos de mineração.

### **1.3. Mitigação da drenagem ácida**

Uma vez iniciado o processo de geração de águas ácidas, este pode perdurar por séculos, gerando problemas ambientais de longas proporções. As técnicas de mitigação e controle da drenagem ácida incluem tratamentos químicos como o uso de calcário, compostos orgânicos e outros materiais, bem como a construção de lagos e áreas alagadas, uso de barreiras geoquímicas (LUZ, 2008) e camadas selantes (ASSIS *et al.*, 2012; DIAS *et al.*, 2008). Estas técnicas podem ser utilizadas isoladamente ou em associação, dependendo das particularidades locais e custos.

Por consumir acidez, o calcário tem sido utilizado na neutralização ou mitigação de drenagem ácida, conforme mostra a reação (1) de dissolução deste composto:



Vários fatores podem influenciar a cinética das reações de dissolução do calcário, assim como as reações de oxidação dos sulfetos, a granulometria dos materiais, a temperatura e pH do meio, a presença de bactérias, a atividade de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>.

Por não considerar a acidez que pode ser gerada pela oxidação de sulfetos, a adoção de métodos de recomendação de calagem normalmente utilizados para correção de solos ácidos tem se revelado ineficiente, subestimando a quantidade de calcário necessária para neutralizar a acidez de materiais sulfetados. De modo geral, as doses de calcário necessárias para neutralizar 100 % do poder acidificante em substratos sulfetados são bastante elevadas. Para a neutralização da acidez gerada por 1.000 t de material contendo 1 % de pirita, seria necessário 16,7 t de  $\text{CaCO}_3$ , ou seja, para a neutralização do substrato de 1 ha até a profundidade de 1 m, considerando a densidade do solo de  $1,0 \text{ kg m}^{-3}$ , há necessidade de cerca de 167 t de calcário com PRNT 100% (MELLO *et. al*, 2003).

Além disso, a utilização de calcário para elevar o pH e precipitar alguns dos elementos solubilizados, quando a arsenopirita está presente, não é adequada, porque o arsênio, normalmente presente em áreas onde ocorre a drenagem ácida, tem sua solubilidade aumentada com aumento do pH (ASSIS, 2006).

Outras técnicas podem ser utilizadas, isoladamente ou em associação com o uso do calcário, visando diminuir os custos de neutralização. Nesse sentido, materiais orgânicos têm sido utilizados baseando-se na correção da acidez por meio de radicais de ácidos fracos presentes, que atuam como agentes tamponantes e, pela complexação de metais, diminuindo sua disponibilidade. LINDSAY *et al.* (2008) observaram que a redução de sulfato, remoção de metais e neutralização de ácidos estiveram presentes em todas as misturas que continham carbono orgânico e que este exerceu fundamental papel na atividade de bactérias redutoras de sulfato. O consumo de carbono orgânico ao longo do tempo geralmente corresponde a decréscimo nas taxas de redução de sulfato e, dessa forma, na eficiência de remediação da drenagem ácida de mina.

A construção de lagos ou áreas alagadas para reduzir a drenagem ácida é uma alternativa de baixo custo e que evita o comprometimento da qualidade de ambientes naturais. As pesquisas realizadas com essas áreas mostram que a melhoria da composição química da drenagem ácida introduzida nesses sistemas se deve à diluição e precipitação de alguns metais, ao baixo potencial redox, limitando a oxidação de sulfetos e, eventualmente, possibilitando a redução de sulfatos, e à alta capacidade de tamponamento da acidez em solos alagados (MELLO *et al.*, 2003).

A barreira geoquímica é formada a partir da precipitação de minerais secundários na superfície dos minerais sulfetados, reduzindo em demasia a difusão do oxigênio e a permeabilidade desses materiais protegendo-os da oxidação (LUZ, 2008; EVANGELOU, 2001). Huminicki *et al.* (2009) mostraram que quando a pirita oxida em pH próximo do neutro na presença de alcalinidade suficiente, camadas de oxihidróxidos de Fe se desenvolvem na superfície da pirita. À medida que essas camadas vão ficando mais espessas e densas, elas bloqueiam o transporte do agente oxidante da solução para a superfície da pirita, reduzindo a taxa de oxidação. A extrapolação dos resultados por tempo mais longo prediz que materiais associados à pirita precisam ser tratados com uma fonte extra de alcalinidade por várias décadas para produzir camadas grossas o suficiente para serem sustentadas pelos níveis típicos de alcalinidade da água subsuperficial do solo. No entanto, uma vez que as camadas se desenvolvem, nenhum tratamento adicional é necessário e oxidações posteriores da pirita simplesmente fazem com que as camadas de oxihidroxidos de Fe fiquem mais grossas e densas, até que todo o grão de pirita seja pseudomorficamente substituído por goethita (HUMINICKI *et al.*, 2009).

Dentre as técnicas citadas acima, maior ênfase será dada àquela que utiliza camadas de cobertura para o substrato. O uso de camadas de cobertura tem como princípio a aplicação de um material de recobrimento do substrato sulfetado, de modo a impedir a passagem de O<sub>2</sub> e água e, assim, evitar a oxidação de sulfetos. A espessura das camadas de cobertura depende do programa de recuperação ambiental a ser empregado e das características do material, como a textura, reatividade, disponibilidade de recursos. A cobertura do material remanescente sulfetado tem sido proposta por Dias *et al.* (2008), visando a revegetação destes ambientes. Esta cobertura é dividida em três camadas:

- Camada de quebra de capilaridade, cuja finalidade é impedir o fluxo ascendente de metais pesados solubilizados com a drenagem ácida e também promover um gradiente de umidade entre a camada acima desta e o material sulfetado, minimizando sua oxidação. Assis *et al.* (2012) testaram diferentes camadas de cobertura para minimizar a mobilização de As, Fe e S em substrato remanescente de mineração de ouro, contendo pirita e arsenopirita. Observou-se que a presença desta camada foi importante para controlar a mobilidade destes elementos, uma vez que a lixiviação destes elementos foi significativamente maior quando não

existia camada de quebra de capilaridade. A presença de materiais de maior granulometria na camada de quebra de capilaridade também pode contribuir significativamente para reduzir a lixiviação destes elementos, o que foi observado por Assis *et al.* (2012), quando comparou brita calcária e areia.

- Camada selante que é utilizada com o objetivo de impedir a passagem de água e oxigênio para o material sulfetado, evitando, desta maneira, sua oxidação. A espessura desta camada é um aspecto importante na revegetação de substratos sulfetados. Segundo Mello *et al.* (2003), quanto maior sua espessura, menor será a possibilidade de oxidação do substrato, processo que também pode ser condicionado pelas características do material argiloso que será utilizado. Neste sentido, Assis *et al.* (2012) mostraram, em laboratório, que um solo argiloso é a melhor alternativa como camada selante quando comparado com laterita e o substrato B1 (substrato sulfetado muito intemperizado, com teores de sulfetos da ordem de  $3,0 \text{ g kg}^{-1}$ ). Já a laterita, quando na camada selante, promoveu menor lixiviação de As e S em relação ao substrato B1, porém a diferença não foi significativa para a lixiviação de Fe.

- Camada de cobertura que é formada por material cujas características sejam as mais próximas possíveis de um solo, favorecendo a atividade biológica na camada e dando suporte ao estabelecimento e crescimento das espécies vegetais. Assis *et al.* (2011) observaram que a presença de solo com calcário na camada de cobertura e solo compactado com calcário na camada selante mostraram melhores resultados para o crescimento de plantas, independente da espécie utilizada, comparado à cobertura com substrato B1.

#### **1.4. Revegetação de substrato sulfetado**

A perda de solo por erosão ou, como no caso de atividades de mineração a céu aberto, a retirada de horizontes superficiais, expõe materiais formados por fragmentos de rochas, caracterizados como substratos remanescentes. Neste sentido, é importante definir solo e substrato no contexto de recuperação de áreas degradadas.

Solo pode ser considerado um material resultante do intemperismo das rochas de origem e de sua interação com diversos fatores como clima, relevo, microrganismos, material de origem e tempo. A partir deste processo são formados horizontes distintos, distribuídos verticalmente. O horizonte mais superficial, em geral, possui maiores teores de matéria orgânica e nutrientes, permitindo a atividade biológica e, conseqüentemente, a ciclagem biogeoquímica, fundamental para a manutenção da sustentabilidade do sistema. Além disso, a presença de matéria orgânica favorece a formação de agregados no solo, resultando na formação de poros e de uma estrutura definida. Dessa forma, este ambiente possibilita a existência de equilíbrio entre as fases sólida, líquida e gasosa, possibilitando o estabelecimento e crescimento de plantas.

Com base na definição de solo é possível caracterizar o substrato como um material no qual a ausência de horizonte orgânico superficial e a ausência de atividade biológica resultam em um sistema cuja sustentabilidade não foi alcançada. Diferentes características físicas e químicas de substratos resultam em limitações ao estabelecimento e crescimento de plantas (DIAS & GRIFFITH, 1998).

A mineração, em geral, pode afetar diversas características do solo como perda da camada superficial, alteração da estrutura, aumento da densidade, diminuição da capacidade de retenção de água, alta resistência à penetração de raízes e perda da matéria orgânica (MOREIRA, 2004), o que dificulta o estabelecimento da vegetação nestas áreas. Tal condição pode se tornar ainda mais hostil devido à presença, em algumas ocasiões, de elementos tóxicos.

A necessidade de recuperação de áreas mineradas para melhorar a qualidade ambiental após o término das operações tem se tornado crescente, muito embora, grande parte das minas exploradas no passado não tenha sido submetida a um plano de fechamento adequado, o que pode representar um grande problema do ponto de vista ambiental. A revegetação é a etapa de recuperação ambiental normalmente utilizada em fechamento de áreas mineradas, devido a diversas características que a tornam vantajosa em relação às demais.

A utilização da vegetação em recuperação de áreas mineradas, segundo Tordoff (2000), apresenta vantagens como eficiência na redução da erosão devido à atuação das raízes na proteção do substrato e capacidade de devolver uma grande quantidade de água

que percola no meio para a atmosfera por meio da evapotranspiração, reduzindo, dessa forma, as concentrações de metais pesados solúveis que atingem os cursos d'água.

Tendo em vista que se constituem em áreas de difícil estabelecimento de vegetação, a revegetação de substratos sulfetados é um desafio a ser enfrentado para a recuperação de substratos que possam gerar drenagem ácida. Dessa forma, é necessário o estabelecimento de condições favoráveis ao desenvolvimento da vegetação nestes ambientes e, para dar início a este processo, normalmente são utilizadas espécies forrageiras.

Um dos objetivos iniciais do uso de plantas forrageiras em programas de recuperação de áreas degradadas é a cobertura do solo a fim de reduzir os processos erosivos e aumentar a entrada de nutrientes no sistema, principalmente o nitrogênio, por meio de leguminosas forrageiras. Além disso, essas espécies intensificam os efeitos positivos de uma cobertura herbácea sobre superfícies mineradas (MELO *et al.*, 2006; SILVA & CORRÊA, 2010).

Entre as diversas forrageiras existentes, o gênero *Stylosanthes* (*Stylosanthes spp*) possui espécies de ocorrência natural no Cerrado; a maioria delas é perene, apresenta potente sistema radicular, estabelece simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio, é tolerante à seca e dotada de grande capacidade de colonizar solos de baixa fertilidade (GODOI *et al.*, 2008).

A crotalária (*Crotalaria spectabilis* Roth.), por sua vez, é uma espécie resistente que representa bom potencial para revegetação de substratos sulfetados, uma vez que é de natural ocorrência nestes materiais, como observado por Neri *et al.* (2004). DIAS *et al.* (2008) observaram que independente do tratamento de cobertura, a crotalária é capaz de produzir quantidade considerável de biomassa, o que tem grande influência na incorporação de carbono no substrato. Além disso, esta espécie é capaz de acumular arsênio, o que possibilita sua utilização em programas de fitorremediação (MELO, 2006).

Dias *et al.* (2008) utilizaram capim gordura (*Melinis minutiflora* P. Beauv) juntamente com outras espécies para revegetação e observaram que, em tratamentos em que este não estava presente, a produção de biomassa foi menor, o que reforça a importância de sua utilização uma vez que produz quantidade considerável de biomassa.

A manutenção da biomassa vegetal tem um papel primordial na manutenção do sistema, uma vez que permite a fixação de carbono e ao mesmo tempo transforma-se num agente de ciclagem de nutrientes, mantendo no sistema um determinado status de nutrientes que resulta na estabilidade ou sustentabilidade do mesmo. Quando o nível de nutrientes ou de energia sofre uma alteração violenta, a estabilidade do sistema é afetada, e um novo equilíbrio deve ser atingido, naturalmente ou por meio da intervenção antrópica (DIAS & GRIFFITH, 1998).

Melo *et al.* (2006), ao estudarem espécies com tolerância ao As e potencial para serem usadas em fitorremediação, observaram que a mucuna preta (*Stizolobium aterrimum* Piper & Tracy) apresenta tolerância a concentrações mais elevadas de As no solo, juntamente com o estilósante (*Stylosanthes spp*) e azevém (*Lolium multiflorum* Lam), ao se considerar a tolerância das espécies com base na concentração crítica disponível no solo.

Dessa forma, tais espécies apresentam grande potencial para programas de revegetação de substratos sulfetados, seja por apresentarem maior tolerância ao As, por serem tolerantes a condições críticas de clima e solo ou por apresentarem capacidade de favorecer a entrada de nutrientes no sistema.

### **1.5. Atividade microbiana do solo**

O uso de indicadores biológicos no monitoramento da qualidade do solo baseia-se no fato de que a atividade biológica do solo reflete a influência conjunta de todos os fatores que regulam a decomposição ou mineralização da matéria orgânica, fundamental para a disponibilidade de nutrientes e agregação de partículas, além de responder rapidamente às mudanças relacionadas ao manejo deste (VEZZANI *et al.*, 2008; DORAN & PARKIN, 1994).

O metabolismo de microrganismos no solo pode ser afetado por intensidade de manejo, cobertura vegetal existente, temperatura, umidade, estágio sucessional da vegetação existente e pela presença de metais pesados. Sendo assim, diversos estudos têm sido realizados de modo a avaliar a atividade microbiana do solo com base nestes fatores perturbadores (AN *et al.*, 2009; LIAO & XIE, 2007; NIEMEYER *et al.*, 2012; NUNES, J. S. *et al.*, 2012; WEI *et al.*, 2011).

A avaliação da atividade microbiana do solo é realizada principalmente pelo método da respirometria, também denominado de evolução de C-CO<sub>2</sub> ou C mineralizável, que determina a respiração microbiana ou respiração basal (GUIMARÃES, 2010). A respiração microbiana refere-se à produção de CO<sub>2</sub> ou consumo de O<sub>2</sub> a partir dos processos metabólicos de microrganismos como bactérias, fungos, algas e protozoários no solo, considerando também as trocas gasosas que resultam dos metabolismos aeróbio e anaeróbio (ANDERSON, 1982). A quantidade de CO<sub>2</sub> liberada indica o carbono lábil ou prontamente metabolizável do solo (DORAN & PARKIN, 1994).

Anderson & Domsch (1985) propuseram uma medida de atividade metabólica específica, denominada quociente metabólico (relação entre a quantidade de CO<sub>2</sub> produzido por unidade de C da biomassa microbiana e por unidade de tempo). Este índice corresponde à atividade heterotrófica específica da biomassa, sendo um indicador sensível para estimar o potencial de decomposição da matéria orgânica. Os valores de C da biomassa microbiana indicam o potencial de reserva de C no solo o qual participa do processo de humificação, permitindo, assim, aferir o acúmulo ou perda de C em função de um determinado manejo ou condição edáfica. Quanto maior o C da biomassa microbiana, maior será a reserva de C no solo, o que expressa um menor potencial de decomposição da matéria orgânica (GAMA-RODRIGUES & GAMA-RODRIGUES, 2008).

A biomassa microbiana representa de 1 a 5 % do total de matéria orgânica presente no solo. Devido a sua alta taxa de rotatividade, ela é diretamente afetada por fatores abióticos e bióticos, sendo, portanto, mais sensível às mudanças ocorridas no ambiente (GAMA-RODRIGUES *et al.*, 2005 e AN *et al.*, 2009). Além de apresentar rápida ciclagem, responde intensamente às flutuações sazonais de umidade e temperatura, ao cultivo e ao manejo de resíduos. Dessa forma, as alterações no sistema de uso e manejo do solo podem ser detectadas muito mais rapidamente por meio da biomassa microbiana e seus metabólitos do que pelos teores de carbono do solo, devido, principalmente à ciclagem da matéria orgânica (SILVA *et al.*, 2010).

Brookes (1995) sugeriu que o quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>) ou ainda, o C da biomassa, expresso como porcentagem do C orgânico do solo (quociente microbiano), poderiam ser melhores indicadores de poluição do solo do que as medições de atividade ou biomassa isoladas. Um quociente metabólico elevado, segundo Carneiro *et al.* (2008),



indica que está ocorrendo maior gasto de energia para a manutenção da comunidade microbiana, ou seja, devido à condição de estresse, os microrganismos têm que consumir mais substrato para sua sobrevivência. Para Anderson & Domsch (1993) a utilização desta relação é importante para avaliar o efeito das condições de estresse sobre a atividade e biomassa microbiana, ou seja, sobre a parte viva da matéria orgânica do solo, incluindo bactérias, actinomicetos, fungos, protozoários, algas e microfauna (GAMA-RODRIGUES & GAMA-RODRIGUES, 2008).

Para um mesmo ambiente, o  $qCO_2$  será menor quanto mais equilibrada ou estável se apresentar a comunidade, aumentando conforme o grau de distúrbio que esta possa vir a sofrer ou, conforme o grau de estresse a que esteja submetida (LYNCH, 2004). Dessa forma, pode ser usado para definir e quantificar mais claramente a atividade microbiana e para caracterizar os riscos de degradação dos solos em termos de matéria orgânica (ANDERSON & DOMSCH, 1985).

Sendo assim, um  $qCO_2$  nulo indica que à medida que uma determinada biomassa microbiana se torna mais eficiente, menos C é perdido como  $CO_2$  pela respiração e uma fração significativa de C é incorporada ao tecido microbiano. Diante disso, a eficiência da biomassa microbiana é maior quando a taxa de respiração é menor (GAMA-RODRIGUES & GAMA-RODRIGUES, 2008).

O quociente microbiano ( $qMIC$ ), por sua vez, expressa índice de qualidade nutricional da matéria orgânica presente. Em solos com matéria orgânica de baixa qualidade nutricional, a biomassa microbiana encontra-se sob condições de estresse, tornando-se incapaz de utilizar totalmente o N e o C orgânico. Nesse caso, a relação C microbiano: C orgânico diminui (GAMA-RODRIGUES & GAMA-RODRIGUES, 2008).

Nunes (2003) comparou os quocientes metabólico e microbiano de uma monocultura e de uma vegetação nativa. Foi observado que estes indicadores variaram com a estação do ano e clima, sendo que no período mais seco o  $qMIC$  foi menor e, além disso, o quociente metabólico foi sensivelmente menor para o solo de vegetação nativa do que para a monocultura.

Carneiro *et al.* (2008) avaliaram a respiração microbiana em solos de área de mineração de bauxita, em duas cronossequências sob diferentes estratégias de

reabilitação. Observou-se que a respiração aumentou com o tempo de reabilitação das áreas, tendo relação direta com o teor de carbono orgânico no solo. Além disso, o quociente metabólico foi superior nas áreas recém-mineradas decorrente do estresse provocado pela mineração, o que indica que houve maior gasto de energia para a sobrevivência dos microrganismos.

Guimarães (2010), também trabalhando com área de mineração de bauxita, avaliou a respiração microbiana em um substrato formado pela disposição de rejeito de bauxita após dez anos de recuperação ambiental. Observou-se que a respiração foi maior em áreas onde houve maior teor de matéria orgânica (MO), porosidade total e menor valor de densidade do substrato, o que indica que a MO atua na formação de agregados, reduzindo a densidade do solo e aumentando a porosidade total, o que melhora a aeração do substrato. Com a redução da densidade e aumento da aeração, os microrganismos terão acesso mais fácil aos nutrientes liberados na mineralização de materiais orgânicos e ao CO<sub>2</sub>, imprescindíveis a sua atividade. Já os produtos desta atividade microbiana atuam na formação dos agregados, melhorando a qualidade física do substrato, reiniciando, dessa forma, o ciclo.

Silva et al. (2010) avaliaram C na biomassa e respiração microbiana de diferentes sistemas de manejo no cerrado e observaram que a biomassa e a atividade microbiana foram influenciadas pelos diferentes sistemas de manejo do solo, e as condições mais satisfatórias para a microbiota do solo ocorreram no Cerrado nativo. O manejo mais intensivo do solo e o uso frequente de agrotóxicos em alguns sistemas, determinaram redução nos teores de C na biomassa microbiana, menores valores do quociente microbiano e maiores valores de qCO<sub>2</sub>, indicando uma provável condição de estresse para a biomassa microbiana.

Diante do exposto, é possível notar que há uma tendência de aumento da respiração microbiana à medida que o sistema caminha para o equilíbrio e, na mesma linha de raciocínio, ocorre a redução dos valores de qCO<sub>2</sub>, indicando maior eficiência da biomassa microbiana ao incorporar o carbono ao tecido microbiano. O qMIC, por sua vez, tende a reduzir em função do desequilíbrio do sistema, ou seja, em ambientes com maior estresse, a tendência é de redução quando comparado com sistemas em equilíbrio.

## **1.6. Considerações finais**

É notável a importância de programas de recuperação ambiental de áreas mineradas, sobretudo aquelas que apresentam materiais sulfetados e potencial para geração de drenagem ácida.

A ocorrência de drenagem ácida está relacionada a presença de materiais sulfetados em ambientes expostos a condições de oxidação e representa um grande problema tanto do ponto de vista ambiental quanto de saúde humana.

A revegetação destas áreas deve ser realizada de maneira criteriosa uma vez que pode, de certa forma, contribuir para a geração de drenagem ácida. Portanto, é necessária a utilização de técnicas que favoreçam o desenvolvimento de plantas e, ao mesmo tempo, impeçam a oxidação deste tipo de material.

## **CAPÍTULO 2**

*Características físicas, químicas e mineralógicas de diferentes materiais de cobertura de substrato sulfetado*

## 2.1. INTRODUÇÃO

A extração mineral é uma atividade preocupante do ponto de vista ambiental devido aos impactos negativos provocados no meio. De modo geral, a mineração pode afetar diversas características do solo como alteração da estrutura, aumento da densidade, diminuição da capacidade de retenção de água, aumento da resistência à penetração de raízes e redução do teor de matéria orgânica (MOREIRA, 2004). Estas alterações dificultam, sobremaneira, o estabelecimento da vegetação no processo de recuperação das áreas exploradas. Tal condição pode se tornar ainda mais hostil devido à presença, em algumas ocasiões, de elementos tóxicos.

Na mineração de ouro, por exemplo, em virtude da ocorrência de drenagem ácida em algumas minas, é comum a mobilização de elementos como arsênio, que apresenta grande toxicidade às plantas e ao ser humano. Neste sentido, técnicas de recuperação que visem à imobilização deste elemento devem ser utilizadas.

A maior mina de produção de ouro em operação no Brasil encontra-se na cidade de Paracatu, MG. Apesar de apresentar o menor teor aurífero do mundo ( $0,459 \text{ g t}^{-1}$ ), é responsável por maior parte da produção brasileira (IBRAM, 2011). A lavra em Paracatu ocorre a céu aberto por meio das etapas de desmatamento, decapeamento e desmonte da rocha. Como consequência, um substrato rochoso, contendo teores de sulfetos da ordem de  $10 \text{ g kg}^{-1}$  fica exposto. Este substrato pode sofrer oxidação ácida e gerar drenagem ácida de mina quando entra em contato com o oxigênio e água, o que diminui consideravelmente os valores de pH da água e, conseqüentemente, mobiliza os metais pesados presentes no meio.

A revegetação destes substratos é um desafio, uma vez que este material, além de não possuir matéria orgânica e nutrientes como fósforo, nitrogênio e potássio, contém teores elevados de sulfetos, o que pode ocasionar desequilíbrio no balanço nutricional das plantas.

Experiências anteriores demonstraram a impossibilidade de estabelecimento da vegetação neste material com teores elevados de sulfetos, dessa forma, camadas de cobertura são estudadas (ASSIS *et al.*, 2011; ASSIS *et al.*, 2012 e DIAS *et al.*, 2008) de modo a oferecer condições mais adequadas ao estabelecimento e crescimento de espécies vegetais acima do substrato sulfetado, atuando tanto no provimento de condições

próximas à de um solo quanto na limitação da mobilização de elementos tóxicos nessas áreas. O objetivo deste trabalho foi avaliar características químicas, físicas e mineralógicas de diferentes materiais utilizados na cobertura de substrato sulfetado remanescente de exploração de ouro, com a finalidade de mitigar a ocorrência de drenagem ácida e fornecer condições favoráveis para o crescimento e estabelecimento de vegetação.

## **2.2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **Caracterização da área em estudo**

A área em estudo localiza-se na cidade de Paracatu, Minas Gerais, no Morro do Ouro, onde ocorre atualmente exploração de ouro e prata pela empresa Kinross Brasil Mineração. A cidade de Paracatu encontra-se na latitude 17°13'20" S e longitude 46°52'29" W estando localizada a 688 m de altitude e a área da jazida entre 645 e 837 m. Nesta região há o predomínio de rochas sedimentares e metassedimentares de ambiente marinho raso a profundo das formações Vazante e Paracatu, as quais pertencem ao grupo Bambuí (COSTA, 1970).

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região de Paracatu pertence ao tipo Aw – clima tropical com estação seca no inverno, de abril a setembro, e o período chuvoso ocorrendo no verão, de outubro a março. A temperatura média anual varia entre 21°C e 24°C. A pluviosidade média anual é de aproximadamente 1390 mm (HENDERSON, 2006).

Predomina na região a vegetação do tipo cerrado, típica do Brasil-Central, caracterizada pela presença de três estratos: arbóreo, arbustivo e herbáceo (SOUZA, 1978).

### **Descrição do Experimento**

O experimento foi instalado sobre um tanque específico desativado, o qual recebia rejeito concentrado com teores elevados de sulfato, um dos produtos do beneficiamento do minério. Este tanque foi impermeabilizado em sua base com argila e polietileno de alta densidade e, da mesma forma, ao final de sua vida útil realizou-se a impermeabilização da superfície.

Inicialmente, pilhas de minério B2 (substrato sulfetado) foram confeccionadas na área utilizada para montagem do experimento. Para o recobrimento destas pilhas foi instalado um ensaio adotando-se o modelo de três camadas (Figura 1), composto por camada de cobertura, camada de selamento e camada de quebra de capilaridade, as quais possuem diferentes materiais (Quadro 1 e 2).

Os materiais utilizados para montagem do experimento compreenderam:

- Substrato B2: é o minério (filito) contendo teores de sulfetos da ordem de  $10,0 \text{ g kg}^{-1}$ , com granulometria de calhau a argila, pouco intemperizado. Este material possui maior quantidade de sulfetos e, portanto, apresenta maior risco de produzir drenagem ácida.

- Substrato B1: é o minério (filito) contendo teores de sulfetos da ordem de  $3,0 \text{ g kg}^{-1}$ , com granulometria de calhau a argila, muito intemperizado.

- Laterita: material composto por concreções ferruginosas encontrado em alguns locais dentro da área de estudo.

- Solo: camada superficial de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, também encontrado dentro da área de estudo, em áreas de empréstimo localizadas próximas ao experimento.

- Brita: brita calcária com granulometria entre 9,5 mm e 19 mm.

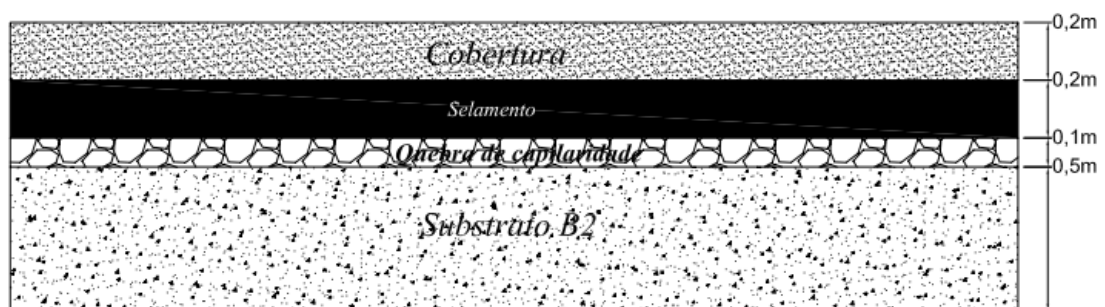


Figura 1. Representação esquemática das diferentes camadas de recobrimento

Quadro 1. Caracterização química das amostras dos materiais utilizados para montagem do experimento de revegetação do substrato B2

Amostra	pH (H <sub>2</sub> O)	P	As	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	t	T	V	m	MO	S
Solo (c. selante)	5,43	0,8	<LD	11	0,21	0,09	0,00	2,3	0,33	0,33	2,63	12,5	0,0	0,53	34,9
Solo (c. de cobertura)	5,06	1,2	<LD	20	0,22	0,09	0,10	2,9	0,36	0,46	3,26	11,0	21,7	0,92	20,9
Laterita	5,24	0,9	<LD	0	0,00	0,06	0,00	3,4	0,06	0,06	3,46	1,7	0,0	-	41,8
B1	5,95	nd	4,9	9	0,40	0,62	0,00	1,4	1,04	1,04	2,44	42,6	0,0	-	82,2
B2	4,98	nd	120,63	24	2,31	1,96	0,10	2,87	4,33	4,43	7,20	61,2	1,97	-	428,0

pH em água – Relação 1:2,5. P, As e K: extrator Mehlich I. Ca, Mg e Al: extrator KCl 1 mol/L. H+Al: extrator Acetato de cálcio 0,5 mol/L pH 7,0. S: extrator fosfato monocálcico em ácido acético. SB: soma de bases. CTC(t): capacidade de troca catiônica efetiva. CTC(T): capacidade de troca catiônica a pH 7,0. V: índice de saturação de bases. m: índice de saturação de alumínio. Mat. Org. (MO): CO x 1,724 (Walkley-Black). nd = não determinado. <LD = menor do que o limite de detecção do método.



Quadro 2. Caracterização química da brita calcária.

Amostra	Fe	Al	CaO	MgO	Ti	As	Mn	P	PN
	— dag kg <sup>-1</sup> —				— mg kg <sup>-1</sup> —			mol kg <sup>-1</sup>	
Brita	0,42	<LD	29,07	15,37	<LD	<LD	388,40	150,80	22,65

LD: limite de detecção. Al: 3 µg L<sup>-1</sup>; Ti: 0,5 µg L<sup>-1</sup>; As: 20 µg L<sup>-1</sup>.

A diferente disposição destes materiais resultou em um experimento com 12 tratamentos e um tratamento adicional (testemunha). Dessa forma, obteve-se um esquema fatorial (1 x 1 x 1) + (2 x 3 x 2), no qual foram testados dois materiais como camada de quebra de capilaridade; dois como camada selante e ausência da mesma; dois como camada de cobertura; mais um tratamento (controle) que consiste em um único material constituindo as três camadas (Quadro 3). Foi adotado o delineamento experimental em blocos casualizados com três repetições, totalizando 39 parcelas experimentais, sendo cada parcela com as dimensões de 20 x 10 m.

Quadro 3. Descrição dos tratamentos implantados no experimento de campo com substrato B2

Tratamento	Camada		
	Quebra de capilaridade (10 cm)	Selante (20 cm)	Cobertura (20 cm)
1 (-)	B1	B1	B1
2 (B1/So/Br)	Brita calcária	Solo	B1
3 (So/So/Br)	Brita calcária	Solo	Solo
4 (B1/B1/Br)	Brita calcária	B1	B1
5 (So/B1/Br)	Brita calcária	B1	Solo
6 (B1-/Br)	Brita calcária	-	B1
7 (So-/Br)	Brita calcária	-	Solo
8 (B1/So/Lt)	Laterita	Solo	B1
9 (So/So/Lt)	Laterita	Solo	Solo
10 (B1/B1/Lt)	Laterita	B1	B1
11 (So/B1/Lt)	Laterita	B1	Solo
12 (B1-/Lt)	Laterita	-	B1
13 (So-/Lt)	Laterita	-	Solo

## Plantio e adubação

Para o plantio, foram selecionadas espécies herbáceas, nativas de cerrado e exóticas com sistema radicular fasciculado ou, se pivotante, sensível a compactação (Quadro 4).

Quadro 4. Relação das espécies utilizadas no experimento e quantidade de sementes utilizadas

Espécies	Quantidade de sementes	Origem	Porte	Sistema Radicular
	kg ha <sup>-1</sup>	-	-	-
<i>Melinis minutiflora</i> P. Beauv (capim gordura)	35	Exótica	Forageira	Fasciculado
<i>Stizolobium aterrimum</i> Piper & Tracy (mucuna preta)	35	Exótica	Leguminosa Herbácea	Pivotante
<i>Lolium multiflorum</i> Lam. (azevém)	15	Exótica	Forageira Herbácea	Fasciculado
<i>Crotalaria spectabilis</i> Roth. (crotalária)	35	Exótica	Leguminosa Herbácea	Pivotante
<i>Stylosanthes spp.</i> – <i>Stylosanthes capitata</i> Vogel e S. <i>macrocephala</i> M. B. Ferr. et S. Costa – (estilosante)	2	Nativa	Forageira Herbácea	Fasciculado

Para o semeio da mistura de espécies, realizado em dezembro de 2011, foram abertos sulcos em cada parcela no sentido transversal de cada bloco, espaçados em 30 cm.

Em cada uma das parcelas com solo como cobertura foram aplicados 2,6 t ha<sup>-1</sup> de calcário (PRNT = 100 %) e nas parcelas com substrato B1 como cobertura, 1,4 t ha<sup>-1</sup> de calcário um mês antes da adubação. A adubação foi realizada com 1,0 t ha<sup>-1</sup> de NPK 8-28-16 mais micronutrientes no plantio. A adubação de cobertura foi realizada com 0,85 t

ha<sup>-1</sup> de NPK 20-00-20 e micronutrientes. Esta adubação foi realizada em duas etapas, sendo a primeira 20 dias após o plantio e a segunda 45 dias após.

### **Caracterização do substrato**

Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas dos materiais da camada de cobertura e deformadas da camada selante. As amostras deformadas foram secas a sombra e passadas em peneira de malha de 2 mm para formar a terra fina seca ao ar (TFSA) e as indeformadas, coletadas no centro de cada parcela em anéis de aproximadamente 100 cm<sup>3</sup> (5 cm de diâmetro e de altura) com auxílio de castelo e martelo. Em seguida as amostras foram cuidadosamente embaladas e acondicionadas para serem transportadas para o laboratório de análise.

As amostras indeformadas foram niveladas à altura dos anéis e mantidas em recipiente com água até 4/5 da altura destes para a saturação por capilaridade e levadas à mesa de tensão e, em seguida à estufa, para determinação da densidade e porosidade (EMBRAPA, 1997).

Posteriormente, foram realizadas as caracterizações químicas, físicas e mineralógicas de todos estes materiais.

As análises químicas consistiram na determinação dos valores de pH em água e em KCl, condutividade elétrica do extrato aquoso (relação solo:água igual a 1), teores disponíveis de P e K (extrator Mehlich-I), teores disponíveis de As e Fe (extrator Mehlich-III), e de S de acordo com metodologia proposta por Alvarez V. *et al.* (2001), teores trocáveis de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>, (H+Al) (EMBRAPA, 1997).

Os teores totais de As, Fe e S foram determinados em chapa aquecedora com cadinhos de teflon com solução de Água Régia mais Ácido Fluorídrico em banho de areia. Pesou-se 0,5 g de amostra com aproximação de 0,0001g, foram adicionados 4,5 ml de HNO<sub>3</sub> e 1,5 ml de HCl e o material foi aquecido a 180°C até adquirir aspecto gelatinoso, com evaporação de praticamente toda solução ácida. Em seguida, o procedimento foi repetido e, após atingir novamente aspecto gelatinoso, o material retirado da chapa aquecedora e deixado em repouso durante uma noite. Em seguida foram adicionados 7 ml de ácido fluorídrico (HF) concentrado e as amostras foram aquecidas novamente até evaporação de toda a solução ácida. Todo material foi transferido para balão de teflon e o volume foi completado para 50 ml. Os teores de As, Fe e S foram determinados por

espectrometria de emissão ótica em plasma induzido – ICP-OES (nos comprimentos de onda 188,979; 238,204 e 181,975 nm para As, Fe e S, respectivamente).

O carbono orgânico total foi determinado por digestão das amostras com dicromato de potássio e ácido sulfúrico concentrado, com fonte externa de calor (YEOMANS & BREMNER, 1988). O teor de matéria orgânica foi determinado a partir da multiplicação do teor de C orgânico, pelo fator de “Van Bemmelen” (1,724) (MENDONÇA & MATOS, 2005).

A caracterização física consistiu na determinação da umidade em campo com sensores Hidrofarm, modelo HFM 1010, instalados nas camadas superficiais (0-20 cm); determinação da textura da TFSA (EMBRAPA, 1997, modificado por Ruiz, 2005); densidade do solo pelo método do anel volumétrico; densidade de partículas e equivalente de umidade (EMBRAPA, 1997). Foram determinadas também macro, microporosidade e porosidade total no solo e no substrato B1, conforme EMBRAPA (1997).

A porosidade total foi calculada pela equação 1, e a macroporosidade pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

$$Pt = 1 - \frac{Ds}{Dp} \quad (1)$$

em que Pt = porosidade total ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ); Ds = densidade do substrato ( $\text{kg dm}^{-3}$ ); e Dp = densidade de partículas ( $\text{kg dm}^{-3}$ ).

Para a caracterização mineralógica foram preparadas lâminas orientadas com as frações argila e silte e lâmina escavada com a fração areia do solo e lâminas orientadas com os substratos B1. A difração de raios-X foi realizada com radiação  $\text{CoK}\alpha$  e monocromador de grafite.

### **Análise estatística**

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância para os diferentes tratamentos em estudo. Os graus de liberdade dos tratamentos foram desdobrados em contrastes ortogonais de modo a se testar o efeito dos tratamentos. Os coeficientes dos contrastes analisados para o experimento são apresentados no Quadro 5 e as respectivas descrições no Quadro 6.

Quadro 5. Coeficientes dos contrastes analisados para os tratamentos estudados

Tratamento	Contrastes ortogonais											
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>
1 (-)	-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 (B1/So/Br)	1	-1	-1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0
3 (So/So/Br)	1	-1	-1	1	0	0	-1	0	0	0	0	0
4 (B1/B1/Br)	1	-1	-1	0	-1	0	1	0	0	0	0	0
5 (So/B1/Br)	1	-1	-1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
6 (B1/-/Br)	1	-1	2	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
7 (So/-/Br)	1	-1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8 (B1/So/Lt)	1	1	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	-1
9 (So/So/Lt)	1	1	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	-1
10 (B1/B1/Lt)	1	1	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	1
11 (So/B1/Lt)	1	1	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	1
12 (B1/-/Lt)	1	1	0	0	0	0	0	2	0	0	-1	0
13 (So/-/Lt)	1	1	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0

Quadro 6. Confronto estabelecido e efeito principal de cada contraste

Contraste	Confronto	Efeito Principal
C <sub>1</sub>	Testemunha vs Tratamentos	Tratamentos
C <sub>2</sub>	Brita vs Laterita na camada de quebra de capilaridade	Camada de quebra de capilaridade
C <sub>3</sub>	Presença vs Ausência de camada selante com brita na camada de quebra de capilaridade	Camada selante
C <sub>4</sub>	B1 vs Solo na camada de cobertura, com brita na camada de quebra de capilaridade e com solo na camada selante	Camada de cobertura
C <sub>5</sub>	B1 vs Solo na camada de cobertura, com brita na camada de quebra de capilaridade e com B1 na camada selante	Camada de cobertura
C <sub>6</sub>	B1 vs Solo na camada de cobertura, com brita na camada de quebra de capilaridade na ausência de camada selante	Camada de cobertura
C <sub>7</sub>	B1 vs Solo na camada selante com brita na camada de quebra de capilaridade	Camada selante
C <sub>8</sub>	Presença vs Ausência de camada selante com laterita na camada de quebra de capilaridade	Camada selante
C <sub>9</sub>	B1 vs Solo na camada de cobertura, com laterita na camada de quebra de capilaridade e com solo na camada selante	Camada de cobertura
C <sub>10</sub>	B1 vs Solo na camada de cobertura, com laterita na camada de quebra de capilaridade e com B1 na camada selante	Camada de cobertura
C <sub>11</sub>	B1 vs Solo na camada de cobertura, com laterita na camada de quebra de capilaridade na ausência de camada selante	Camada de cobertura
C <sub>12</sub>	B1 vs Solo na camada selante com laterita na camada de quebra de capilaridade	Camada selante

## **2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **2.3.1. Camada de cobertura**

#### ***2.3.1.1. Caracterização química***

Após o plantio a formação da cobertura vegetal nas parcelas pode ter favorecido a alteração de algumas propriedades químicas dos materiais. No quinto mês foi observado aumento nos valores de pH tanto para o solo quanto para o substrato B1 utilizados na montagem do experimento. Teores de fósforo e potássio disponíveis também foram maiores devidos, principalmente, à adubação realizada com N-P-K. Maiores teores de  $\text{Ca}^{2+}$  também foram obtidos devido à aplicação de calcário nos materiais.

Foi observada incorporação de matéria orgânica (MOS) ao substrato B1 após os cinco meses de plantio ( $0,44 \text{ dag kg}^{-1}$ ), uma vez que, inicialmente este material não apresentava teor detectável de MOS. Da mesma forma, a média dos teores de matéria orgânica para o solo, que antes do plantio era de  $0,92 \text{ dag kg}^{-1}$  (Quadro 1), aumentou para  $3,46 \text{ dag kg}^{-1}$  (Quadro 7). Este aumento foi ocasionado pela incorporação de MOS proveniente da decomposição do material vegetal produzido nos tratamentos. A variação foi maior para o solo do que o substrato B1 devido a maior quantidade de biomassa nestes tratamentos.

Observou-se também aumento da CTC efetiva tanto para o solo quanto para o substrato B1 devido ao aumento do teor de MOS e à elevação do valor de pH, fazendo com que ions  $\text{H}^+$  ligados às cargas dependentes de pH do solo e do substrato sejam neutralizados resultando no aumento da CTC.

Os teores de enxofre disponível foram maiores para o substrato B1 e menores para o solo após o plantio. A queda dos teores de enxofre disponível no solo pode ter sido ocasionada pela absorção deste nutriente pelas plantas e também pela perda por lixiviação, uma vez que este elemento apresenta grande mobilidade no solo.

Quadro 7. Características químicas dos materiais da camada de cobertura para os tratamentos após cinco meses de plantio

Trat.	pH		P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	CTC (t)	CTC (T)	V	m	MO	P-rem	S disponível	CE
	H <sub>2</sub> O	KCl	mg dm <sup>-3</sup>		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>							—%—	dag kg <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mS cm <sup>-1</sup>	
T1	7,46	7,19	29,97	97,67	1,11	0,59	0,00	0,83	1,94	1,94	2,77	69,10	0,00	0,35	52,47	100,63	0,71
T2	6,63	5,79	35,80	90,00	0,89	0,71	0,00	0,60	1,83	1,83	2,43	76,17	0,00	0,39	52,27	109,10	0,77
T3	5,88	4,80	9,50	355,33	3,77	1,67	0,00	5,53	6,36	6,36	11,89	54,67	0,00	3,61	23,00	13,17	0,55
T4	6,14	5,85	25,93	73,67	0,97	0,70	0,00	0,50	1,86	1,86	2,36	77,63	0,00	0,61	50,03	190,73	0,96
T5	5,93	4,99	14,50	375,33	3,55	1,65	0,00	5,53	6,16	6,16	11,69	53,80	0,00	3,65	24,07	12,93	0,42
T6	7,17	6,83	34,80	84,67	1,26	0,80	0,00	0,57	2,28	2,28	2,84	81,00	0,00	0,43	53,57	182,43	1,15
T7	5,66	4,53	13,67	245,33	2,94	1,18	0,06	4,90	4,74	4,81	9,64	49,50	1,53	3,26	22,07	16,33	0,36
T8	5,89	5,55	20,87	70,67	0,74	0,95	0,00	1,13	1,87	1,87	3,00	63,67	0,00	0,40	47,60	153,20	0,91
T9	5,81	4,80	10,23	315,33	3,37	1,37	0,03	5,20	5,55	5,59	10,75	51,67	0,63	3,74	22,60	9,57	0,34
T10	6,78	6,52	34,90	83,33	0,85	0,54	0,00	0,93	1,60	1,60	2,54	61,73	0,00	0,48	57,10	86,87	0,74
T11	5,45	4,65	8,73	372,00	2,77	1,06	0,10	5,63	4,78	4,88	10,41	45,73	2,07	3,65	24,33	13,40	0,56
T12	6,74	6,46	26,40	90,33	0,99	1,16	0,00	0,87	2,38	2,38	3,25	75,37	0,00	0,44	50,63	193,20	1,38
T13	5,91	4,70	13,03	342,00	3,24	1,53	0,00	4,60	5,64	5,64	10,24	55,10	0,00	2,87	21,30	9,67	0,48

pH em água – Relação 1:2,5. P e K: extrator Mehlich I. Ca, Mg e Al: extrator KCl 1 mol/L. H+Al: extrator Acetato de cálcio 0,5 mol/L pH 7,0. S: extrator fosfato monocalcico em ácido acético. SB: soma de bases. CTC(t): capacidade de troca catiônica efetiva. CTC(T): capacidade de troca catiônica a pH 7,0. V: índice de saturação de bases. m: índice de saturação de alumínio. Mat. Org. (MO): CO x 1,724 (Walkley-Black). P-rem: Fósforo Remanescente. CE: Condutividade Elétrica do Extrato Aquoso (Relação 1:1).



O teores médios de arsênio total encontrados para tratamentos com solo na camada de cobertura foram de  $0,650 \text{ g kg}^{-1}$ , enquanto a média para o substrato B1 foi de  $0,797 \text{ g kg}^{-1}$  (Quadro 8). Já os teores de arsênio disponível foram de  $0,30 \text{ mg dm}^{-3}$  para o solo e  $13,51 \text{ mg dm}^{-3}$  para o substrato B1. Esta diferença também é responsável, assim como fatores físicos, pela melhor resposta do crescimento da vegetação nos tratamentos em que o solo estava presente na camada de cobertura (Capítulo 2). Observou-se aumento dos teores disponíveis de arsênio tanto no solo quanto do substrato B1 após o plantio. Antes da montagem do experimento, o solo não apresentava teor de arsênio disponível acima do limite de detecção do método utilizado e o substrato B1 apresentava teores de  $4,9 \text{ mg dm}^{-3}$  (Quadro 1).

Devido aos teores de arsênio encontrados em maior quantidade no substrato B1, observou-se diferença significativa dos teores de arsênio total entre tratamentos com solo e substrato na camada de cobertura (Quadro 9) (C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>, C<sub>6</sub>, C<sub>9</sub>, C<sub>10</sub> e C<sub>11</sub>). Da mesma forma, nos tratamentos em que a camada de quebra de capilaridade era formada por brita calcária, e que possuíam solo ou substrato B1 na camada selante, foi observada diferença significativa nos teores totais de arsênio na camada cobertura ( $p < 0,01$ ; C<sub>7</sub>). A média dos teores de As total para tratamentos que continham substrato B1 na camada selante (T<sub>4</sub> e T<sub>5</sub>) foi de  $0,63 \text{ g kg}^{-1}$  a mais do que naqueles que continham solo (T<sub>2</sub> e T<sub>3</sub>) (Quadro 10).

Teores elevados de arsênio encontrados nos tratamentos que contêm B1 na camada de cobertura podem ser explicados pela grande adsorção por parte dos minerais que contêm ferro em sua estrutura. Segundo Assis (2006), este arsênio é residual, provavelmente advindo da oxidação de arsenopirita que ocorreu muito antes pelo processo natural de intemperismo ocorrido neste substrato. Os baixos teores de enxofre total ou estão relacionados à sua mobilidade e, possivelmente, maior parte já foi lixiviada, ou à facilidade com que este elemento se volatiliza quando submetido às altas temperaturas como as do método de análise utilizado.

Quadro 8. Teores totais médio de Arsênio (As), Ferro (Fe) e Enxofre (S) nas camadas de cobertura, cinco meses após o plantio

Tratamento		As	Fe	S
		g kg <sup>-1</sup>		
T1	(-)	0,65	44,55	0,74
T2	(B1/So/Br)	1,10	50,40	1,18
T3	(So/So/Br)	0,23	48,01	1,10
T4	(B1/B1/Br)	0,69	42,30	1,97
T5	(So/B1/Br)	0,01	48,76	0,63
T6	(B1/-/Br)	0,78	37,31	0,71
T7	(So/-/Br)	0,03	49,72	0,42
T8	(B1/So/Lt)	0,85	43,74	3,00
T9	(So/So/Lt)	0,00	52,02	0,72
T10	(B1/B1/Lt)	0,75	37,18	1,28
T11	(So/B1/Lt)	0,06	51,95	0,77
T12	(B1/-/Lt)	0,76	38,01	1,92
T13	(So/-/Lt)	0,06	49,87	0,55

Quadro 9. Análise de variância para As, Fe e S total nas camadas de cobertura, cinco meses após o plantio

F. V.	GL	QM		
		As	Fe	S
Blocos	2	-	-	-
C <sub>1</sub>	1	0,1231*	4,12	0,5580
C <sub>2</sub>	1	0,0306	3,45	1,2469
C <sub>3</sub>	1	0,0441	59,39	1,7248
C <sub>4</sub>	1	1,1528**	8,57	0,0081
C <sub>5</sub>	1	0,7004**	62,53	2,7203°
C <sub>6</sub>	1	0,8437**	231,14**	0,1320
C <sub>7</sub>	1	0,3008**	40,55	0,0800
C <sub>8</sub>	1	0,0001	20,78	0,1722
C <sub>9</sub>	1	1,0584**	102,67°	7,7976**
C <sub>10</sub>	1	0,7073**	327,52**	0,4004
C <sub>11</sub>	1	0,7350**	210,99**	2,7744°
C <sub>12</sub>	1	0,0008	32,97	2,1080408
Resíduo	24	0,0191	26,64	0,8611
CV (%)		30,16	11,30	80,39

Quadro 10. Contrastes médios e sua significância para teores de As, Fe e S total nas camadas de cobertura, cinco meses após o plantio

Contraste	Contrastes Médios		
	As	Fe l	S
		g kg <sup>-1</sup>	
C <sub>1</sub>	-0,21*	1,22	0,45
C <sub>2</sub>	-0,04	-0,41	0,25
C <sub>3</sub>	-0,02	-0,77	-0,13
C <sub>4</sub>	-0,44**	-1,20	-0,04
C <sub>5</sub>	-0,68**	6,45	-1,34°
C <sub>6</sub>	-0,12**	2,07**	-0,05
C <sub>7</sub>	-0,63**	-7,36	0,32
C <sub>8</sub>	-0,01	-4,56	-0,42
C <sub>9</sub>	-0,84**	8,28°	-2,28**
C <sub>10</sub>	-0,35**	7,39**	-0,26
C <sub>11</sub>	-0,70**	11,86**	-1,36°
C <sub>12</sub>	-0,03	-6,63	-1,68
CV (%)	30,16	11,30	80,39

°, \*, \*\*: Significativo a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.

C<sub>1</sub> (T<sub>1</sub> vs T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>+T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>2</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub> vs T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>3</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub> vs T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>); C<sub>4</sub> (T<sub>2</sub> vs T<sub>3</sub>); C<sub>5</sub> (T<sub>4</sub> vs T<sub>5</sub>); C<sub>6</sub> (T<sub>6</sub> vs T<sub>7</sub>); C<sub>7</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub> vs T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>); C<sub>8</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub> vs T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>9</sub> (T<sub>8</sub> vs T<sub>9</sub>); C<sub>10</sub> (T<sub>10</sub> vs T<sub>11</sub>); C<sub>11</sub> (T<sub>12</sub> vs T<sub>13</sub>) e C<sub>12</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub> vs T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>)

Os teores de As disponível nas camadas de substrato B1 (Quadro 12) foram significativamente maiores do que nas camadas de solo ( $p < 0,01$ ) (contrastes C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>, C<sub>6</sub>, C<sub>9</sub>, C<sub>10</sub> e C<sub>11</sub>), devido à presença natural deste elemento no B1. Por outro lado, não foi observada diferença significativa para os teores de As disponível considerando-se a presença ou ausência de camada selante (C<sub>3</sub> e C<sub>8</sub>).

A média dos teores disponíveis de arsênio (Quadro 13) foi de 1,09 mg dm<sup>-3</sup> ( $p < 0,10$ ) a mais nos tratamentos que continham brita calcária na camada de quebra de capilaridade do que naqueles que continham laterita (C<sub>2</sub>). Dessa forma, espera-se que a laterita consiga reter melhor os elementos uma vez que é formada por óxidos de ferro, o que favorece a adsorção dos mesmos devido à presença de cargas em sua superfície e à elevada superfície específica, o que desempenha um importante papel na adsorção de ânions e metais pesados. A brita calcária, por sua vez, com o aumento do pH pode ter promovido a co-precipitação do As com Fe e S, porém este efeito foi menor do que a adsorção de As pela laterita, resultando desta forma em menores teores deste elemento quando esta estava presente na CQC. Porém, os teores de enxofre e ferro disponível não apresentaram diferença significativa para este contraste, o que pode ter sido influenciado

pela proximidade dos teores de ferro entre solo e substrato B1 e pela grande variação no teor de enxofre no substrato B1 utilizado para compor o experimento.

Quadro 11. Teores disponíveis de As, Fe e S nas camadas de cobertura no quinto mês após o plantio

Tratamento		As <sup>1</sup>	Fe <sup>1</sup>	S <sup>2</sup>
mg dm <sup>-3</sup>				
T1	(-)	13,11	375,92	100,63
T2	(B1/So/Br)	13,65	554,99	109,10
T3	(So/So/Br)	0,31	299,15	13,17
T4	(B1/B1/Br)	14,47	517,03	190,73
T5	(So/B1/Br)	0,51	315,98	12,93
T6	(B1/-/Br)	17,47	313,28	182,43
T7	(So/-/Br)	0,13	265,80	16,33
T8	(B1/So/Lt)	7,66	850,34	153,20
T9	(So/So/Lt)	0,12	309,17	9,57
T10	(B1/B1/Lt)	14,23	380,75	86,87
T11	(So/B1/Lt)	0,25	288,29	13,40
T12	(B1/-/Lt)	13,98	529,18	193,20
T13	(So/-/Lt)	0,49	225,50	9,67

<sup>1</sup> Extrator Mehlich III

<sup>2</sup> Extrator Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 500 mg L<sup>-1</sup> de P, em HOAc 2 mol L<sup>-1</sup>

Quadro 12. Análise de variância para As, Fe e S disponíveis na camada de cobertura no quinto mês após o plantio

F. V.	GL	QM		
		As	Fe	S
Blocos	2	-	-	-
C <sub>1</sub>	1	105,56**	2201,73	905,56
C <sub>2</sub>	1	24,12°	25124,89	864,36
C <sub>3</sub>	1	9,81	69955,84	1281,64
C <sub>4</sub>	1	266,80**	98176,04	13804,81
C <sub>5</sub>	1	292,32**	60631,65	47419,26*
C <sub>6</sub>	1	450,49**	3382,00	41383,81*
C <sub>7</sub>	1	0,79	334,86	4969,47
C <sub>8</sub>	1	11,08	25468,97	5090,82
C <sub>9</sub>	1	85,20**	439302,86**	30945,80*
C <sub>10</sub>	1	293,16**	12823,28	8096,03
C <sub>11</sub>	1	273,10**	138335,35	50526,73**
C <sub>12</sub>	1	33,77*	180427,97°	2929,69
Resíduo	24	6,34	52149,6088	6163,46
CV (%)		33,96	56,81	93,53

Quadro 13. Contrastes médios para As, Fe e S disponíveis no quinto mês após o plantio

Contraste	Contrastes Médios		
	As	Fe	S
	mg dm <sup>-3</sup>		
C <sub>1</sub>	-6,18**	28,2	-18,08
C <sub>2</sub>	-1,09°	35,22	-6,53
C <sub>3</sub>	0,31	-26,45	3,58
C <sub>4</sub>	-6,67**	-127,92	-47,97
C <sub>5</sub>	-13,96**	-201,05	-177,8*
C <sub>6</sub>	-2,89**	-7,91	-27,68*
C <sub>7</sub>	1,03	-21,13	81,40
C <sub>8</sub>	3,33	-159,59	71,35
C <sub>9</sub>	-7,54**	-541,17**	-143,63*
C <sub>10</sub>	-6,99**	-46,23	-36,73
C <sub>11</sub>	-13,49**	-303,68	-183,53**
C <sub>12</sub>	6,71*	-490,48°	-62,50
CV (%)	33,96	56,81	93,53

°, \*, \*\*: Significativo a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.

C<sub>1</sub> (T<sub>1</sub> vs T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>+T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>2</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub> vs T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>3</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub> vs T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>); C<sub>4</sub> (T<sub>2</sub> vs T<sub>3</sub>); C<sub>5</sub> (T<sub>4</sub> vs T<sub>5</sub>); C<sub>6</sub> (T<sub>6</sub> vs T<sub>7</sub>); C<sub>7</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub> vs T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>); C<sub>8</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub> vs T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>9</sub> (T<sub>8</sub> vs T<sub>9</sub>); C<sub>10</sub> (T<sub>10</sub> vs T<sub>11</sub>); C<sub>11</sub> (T<sub>12</sub> vs T<sub>13</sub>) e C<sub>12</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub> vs T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>)

Observou-se aumento dos teores disponíveis de As nas camadas de solo na cobertura ao longo do tempo. A média para os tratamentos com solo na camada de cobertura no quinto mês era de 0,30 mg dm<sup>-3</sup> de As disponível, enquanto no décimo terceiro mês foi de 0,74 mg dm<sup>-3</sup> (Quadro 14). Conforme sugerido por Assis (2006), a presença de plantas nesta camada pode ter contribuído para a ascensão deste elemento, devido à evapotranspiração que estaria provocando um gradiente de umidade no perfil. Além disto, a presença da camada de vegetação acima deste material pode ter contribuído para absorção deste elemento pelas plantas. Como são plantas de ciclo relativamente curto, sua disposição no solo após a morte de alguns indivíduos pode ter favorecido sua incorporação ao solo.

Assis (2006) e Ribeiro Jr. (2002), encontraram teores menores de arsênio total neste mesmo tipo de solo, 15,6 mg kg<sup>-1</sup> e 8,92 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Tal diferença pode ter sido ocasionada pela expressiva heterogeneidade do material estudado ou pela presença de vegetação acima desta camada, favorecendo a ascensão deste elemento devido à evapotranspiração ou também, como foi dito anteriormente, pela ciclagem deste elemento.

Quadro 14. Teores médios de Arsênio (As) e Ferro (Fe) disponível nas camadas de cobertura dos treze tratamentos no décimo terceiro mês após o plantio

Tratamento		As <sup>VI</sup>	Fe <sup>VI</sup>
		mg dm <sup>-3</sup>	
T1	(-)	12,46	235,10
T2	(B1/So/Br)	10,22	242,41
T3	(So/So/Br)	1,32	124,53
T4	(B1/B1/Br)	11,51	219,30
T5	(So/B1/Br)	0,78	147,46
T6	(B1/-/Br)	12,51	163,94
T7	(So/-/Br)	0,47	98,82
T8	(B1/So/Lt)	7,24	377,28
T9	(So/So/Lt)	1,04	135,55
T10	(B1/B1/Lt)	11,85	144,47
T11	(So/B1/Lt)	0,17	146,24
T12	(B1/-/Lt)	13,25	329,36
T13	(So/-/Lt)	0,64	91,99

<sup>VI</sup> Extrator Mehlich III

Quadro 15. Análise de variância para As e Fe disponíveis no décimo terceiro mês após o plantio

F. V.	GL	QM	
		As	Fe
Blocos	2	-	-
C <sub>1</sub>	1	118,68**	6920,92
C <sub>2</sub>	1	1,71	13045,45
C <sub>3</sub>	1	1,12	10833,69
C <sub>4</sub>	1	118,81**	20842,36
C <sub>5</sub>	1	172,81**	7741,48
C <sub>6</sub>	1	217,56**	6359,62
C <sub>7</sub>	1	0,41	0,02
C <sub>8</sub>	1	13,94	383,31
C <sub>9</sub>	1	57,54**	87654,92*
C <sub>10</sub>	1	204,40**	4,68
C <sub>11</sub>	1	238,64**	84523,90*
C <sub>12</sub>	1	10,45	37004,08
Resíduo	24	6,36	18485,05
CV (%)		39,27	71,95

Quadro 16. Contrastes médios e sua significância para valores de As e Fe disponíveis no décimo terceiro mês após o plantio

Contraste	Contrastes Médios	
	As	Fe
	mg dm <sup>-3</sup>	
C <sub>1</sub>	-6,55**	-49,99
C <sub>2</sub>	-0,29	25,38
C <sub>3</sub>	0,11	-10,41
C <sub>4</sub>	-4,45**	-58,94
C <sub>5</sub>	-10,73**	-71,84
C <sub>6</sub>	-2,01**	-10,85
C <sub>7</sub>	0,74	-0,18
C <sub>8</sub>	3,73	19,58
C <sub>9</sub>	-6,20**	-241,73*
C <sub>10</sub>	-5,84**	0,88
C <sub>11</sub>	-12,61**	-237,38*
C <sub>12</sub>	3,74	-222,12
CV (%)	39,27	71,95

°, \*, \*\*: Significativo a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.

C<sub>1</sub> (T<sub>1</sub> vs T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>+T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>2</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub> vs T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>3</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub> vs T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>); C<sub>4</sub> (T<sub>2</sub> vs T<sub>3</sub>); C<sub>5</sub> (T<sub>4</sub> vs T<sub>5</sub>); C<sub>6</sub> (T<sub>6</sub> vs T<sub>7</sub>); C<sub>7</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub> vs T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>); C<sub>8</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub> vs T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>9</sub> (T<sub>8</sub> vs T<sub>9</sub>); C<sub>10</sub> (T<sub>10</sub> vs T<sub>11</sub>); C<sub>11</sub> (T<sub>12</sub> vs T<sub>13</sub>) e C<sub>12</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub> vs T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>).

### 2.3.1.2. Caracterização física

Como os materiais foram movimentados e trabalhados com o uso de máquinas, houve perda de sua estrutura original. Este fato contribuiu para o aumento da densidade do solo com valores que podem ser limitantes para o movimento da água no solo e para o crescimento de raízes. Sendo assim, a incorporação de matéria orgânica no sistema é uma prática que contribui sobremaneira para acelerar o processo de estruturação das camadas de cobertura, propiciando melhores condições para o estabelecimento da vegetação.

Foram observados (Quadro 17) menores valores de densidade nos tratamentos que continham solo na camada de cobertura e estes foram significativamente menores do que o B1 (Quadros 18 e 19). A densidade média para os tratamentos com solo na camada de cobertura foi de 1,29 kg dm<sup>-3</sup>, enquanto para tratamentos com substrato B1 foi de 1,62 kg dm<sup>-3</sup> (Quadro 19). Maiores valores de densidade deste substrato podem dificultar o crescimento radicular, devido à sua relação com a resistência à penetração pelas raízes, que, juntamente com outros fatores, como capacidade de campo, porosidade de aeração

e ponto de murcha permanente, pode limitar a quantidade de água disponível para as raízes das plantas.

Como esperado, a porosidade também variou em função do material presente na camada de cobertura. O solo apresenta menor valor de densidade. Já a porosidade neste material foi maior do que no substrato B1 (Quadro 17), o que ocorre também com a umidade, tanto no período seco quanto no período chuvoso (Quadro 20). Dessa forma, solo na camada de cobertura resulta em maior disponibilidade de água para as plantas devido à sua maior capacidade de campo e menor densidade, o que proporciona maior crescimento às plantas e, conseqüentemente, maior produção de biomassa.

Quadro 17. Valores médios de densidade (Ds), macroporosidade (Pma), microporosidade (Pmi), porosidade total (Pt), equivalente de umidade (EU) e proporção de areia, silte e argila nas camadas de cobertura dos treze tratamentos estudados

Tratamento	Ds	Dp	Pmi	Pma	Pt	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila
	kg dm <sup>-3</sup>		—m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> —			—dag kg <sup>-1</sup> —			
T1	1,61	2,53	0,32	0,04	0,36	17	12	66	5
T2	1,63	2,54	0,34	0,02	0,36	20	12	63	5
T3	1,29	2,62	0,35	0,15	0,51	4	6	19	71
T4	1,62	2,52	0,31	0,05	0,36	17	11	68	4
T5	1,39	2,70	0,39	0,09	0,48	5	5	21	69
T6	1,58	2,49	0,32	0,05	0,37	21	11	64	4
T7	1,26	2,57	0,37	0,14	0,51	4	6	17	73
T8	1,66	2,55	0,31	0,04	0,35	20	13	61	6
T9	1,25	2,59	0,36	0,15	0,52	4	5	19	72
T10	1,61	2,65	0,27	0,12	0,39	19	11	65	5
T11	1,24	2,58	0,36	0,16	0,52	4	5	18	73
T12	1,62	2,48	0,31	0,04	0,35	18	10	68	4
T13	1,31	2,65	0,38	0,12	0,51	17	12	66	5

De acordo com a classificação textural proposta por Santos *et al.* (2005), o solo apresenta textura muito argilosa (72 % de argila), enquanto o substrato B1 possui textura franco siltosa, com proporções de silte em média de 65 %. O substrato B1 possui elevada



proporção de silte, que faz com que o material apresente maiores valores de densidade do solo, devido a melhor acomodação das partículas. Apesar do substrato B1 ser originado de rocha moída, foi utilizada metodologia de análise textural normalmente aplicada para solos. Os valores de densidade de partículas foram utilizados para cálculo da velocidade de sedimentação das partículas de silte pela lei de Stokes.

Quadro 18. Análise de variância para densidade do solo (Ds), macroporosidade (Pma), microporosidade (Pmi) e porosidade total (Pt)

F. V.	GL	QM			
		Ds	Pma	Pmi	Pt
Blocos	2	-	-	-	-
C <sub>1</sub>	1	0,0731**	0,0085**	0,0009	0,0163**
C <sub>2</sub>	1	0,0012	0,0005	0,0012	0,0000
C <sub>3</sub>	1	0,0182°	0,0002	0,0001	0,0002
C <sub>4</sub>	1	0,1700**	0,0400**	0,0004	0,0451**
C <sub>5</sub>	1	0,0770**	0,0033°	0,0096**	0,0241**
C <sub>6</sub>	1	0,1568**	0,0131**	0,0043**	0,0323**
C <sub>7</sub>	1	0,0070	0,0030°	0,0000	0,0021
C <sub>8</sub>	1	0,0020	0,0028	0,0015°	0,0015
C <sub>9</sub>	1	0,2604**	0,0193**	0,0043**	0,0433**
C <sub>10</sub>	1	0,1944**	0,0113**	0,0104**	0,0267**
C <sub>11</sub>	1	0,1411**	0,0104**	0,0073**	0,0368**
C <sub>12</sub>	1	0,0024	0,0008	0,0014°	0,0010
Resíduo	24	0,1252	0,0010	0,0004	0,0010
CV (%)		4,93	36,44	6,10	7,22

Maiores valores de densidade e menores de porosidade e umidade foram encontrados no substrato B1 devido à sua composição, principalmente, por filito que, quando quebrado, concentra sua granulometria na fração silte. Como o filito é constituído de minerais micáceos, pode ser facilmente orientado e compactado, formando uma camada selante, pouco permeável ao fluxo de água e oxigênio (RIBEIRO JR., 2002).

Segundo Siqueira *et al.* (2008), a ausência de cobertura adequada no solo resulta em baixa disponibilidade de nutrientes para os microrganismos e torna-o susceptível a variações amplas de temperatura e umidade. Tal fato pode ser observado de acordo com os dados de umidade obtidos (Quadro 20). De modo geral, houve variação da umidade nas camadas de cobertura em função do tempo seco e chuvoso.

Quadro 19. Contrastes médios e sua significância para valores de densidade do solo (Ds), macroporosidade (Pma), microporosidade (Pmi) e porosidade total (Pt)

Contraste	Contrastes Médios			
	Ds	Pma	Pmi	Pt
	kg dm <sup>-3</sup>		m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	
C <sub>1</sub>	-0,17**	0,06**	0,02	0,08**
C <sub>2</sub>	0,00	0,01	0,00	0,00
C <sub>3</sub>	-0,01 <sup>o</sup>	0,00	0,00	0,00
C <sub>4</sub>	-0,20**	0,08**	0,01	0,09**
C <sub>5</sub>	-0,23**	0,05 <sup>o</sup>	0,08**	0,13**
C <sub>6</sub>	-0,05**	0,02**	0,01**	0,02**
C <sub>7</sub>	0,17	-0,06 <sup>o</sup>	0,01	-0,05
C <sub>8</sub>	0,04	-0,05	0,02 <sup>o</sup>	-0,03
C <sub>9</sub>	-0,41**	0,11**	0,06**	0,17**
C <sub>10</sub>	-0,18**	0,04**	0,02**	0,06**
C <sub>11</sub>	-0,31**	0,08**	0,07**	0,16**
C <sub>12</sub>	-0,06	0,03	0,00 <sup>o</sup>	0,04
CV (%)	4,93	36,44	6,10	7,22

<sup>o</sup>, \*, \*\*: Significativo a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.

C<sub>1</sub> (T<sub>1</sub> vs T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>+T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>2</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub> vs T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>3</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub> vs T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>); C<sub>4</sub> (T<sub>2</sub> vs T<sub>3</sub>); C<sub>5</sub> (T<sub>4</sub> vs T<sub>5</sub>); C<sub>6</sub> (T<sub>6</sub> vs T<sub>7</sub>); C<sub>7</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub> vs T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>); C<sub>8</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub> vs T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>9</sub> (T<sub>8</sub> vs T<sub>9</sub>); C<sub>10</sub> (T<sub>10</sub> vs T<sub>11</sub>); C<sub>11</sub> (T<sub>12</sub> vs T<sub>13</sub>) e C<sub>12</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub> vs T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>)

Como dito anteriormente, o substrato B1 é formado por minerais micáceos e composto basicamente por partículas de silte. Estas características conferem ao material menor capacidade de retenção de água, resultando em menores valores de umidade encontrados para este material. Na primeira avaliação, realizada no meio do período seco apresentou valores de umidade média de 0,11 kg kg<sup>-1</sup> para o solo e 0,03 kg kg<sup>-1</sup> para o substrato B1 (Quadro 20). Na avaliação realizada em janeiro de 2013, início do período chuvoso, houve aumento mais expressivo na umidade do solo uma vez que a média foi de 0,30 kg kg<sup>-1</sup>, enquanto no substrato B1 foi de 0,06 kg kg<sup>-1</sup>. A diferença de umidade entre período seco e chuvoso afetou consideravelmente a produção de biomassa nos tratamentos. Foi observada seca praticamente de todas as espécies durante o período seco em consequência da menor quantidade de água disponível para as plantas do substrato B1.

Na segunda avaliação (13<sup>o</sup> mês) observou-se diferença significativa (Quadro 21) de umidade entre os tratamentos que possuem camada selante e aqueles que não possuem, com brita na camada de quebra de capilaridade (C<sub>3</sub>). A umidade nos tratamentos que possuem camada selante (T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub> e T<sub>5</sub>) foi de 0,02 kg kg<sup>-1</sup> (p<0,01) maior do que a

média daqueles que não possuem (T<sub>6</sub> e T<sub>7</sub>) (Quadro 22). Esta diferença pode ter sido ocasionada pela maior drenagem da água presente no material quando a camada selante não estava presente. Tal resultado demonstra a importância da camada selante para evitar o contato da água com o substrato B2 evitando, portanto, a oxidação deste material. Por outro lado, a umidade nos tratamentos que possuíam laterita na camada de quebra de capilaridade não apresentou diferença significativa entre tratamentos com e sem camada selante (C<sub>8</sub>). Deste modo, acredita-se que a brita calcária promova maior drenagem da água na ausência de camada selante, o que não é satisfatório uma vez que o contato da água com o substrato B2 provoca sua oxidação e conseqüente mobilização de elementos tóxicos.

Quadro 20. Valores médios de umidade nas camadas de cobertura no décimo e décimo terceiro mês após o plantio

Tratamento		Umidade (10° mês)	Umidade (13° mês)
		kg kg <sup>-1</sup>	
T1	(-)	0,06	0,09
T2	(B1/So/Br)	0,02	0,08
T3	(So/So/Br)	0,12	0,33
T4	(B1/B1/Br)	0,03	0,06
T5	(So/B1/Br)	0,10	0,33
T6	(B1/-/Br)	0,01	0,02
T7	(So/-/Br)	0,10	0,21
T8	(B1/So/Lt)	0,03	0,07
T9	(So/So/Lt)	0,14	0,33
T10	(B1/B1/Lt)	0,00	0,05
T11	(So/B1/Lt)	0,10	0,30
T12	(B1/-/Lt)	0,03	0,08
T13	(So/-/Lt)	0,12	0,29

Quadro 21. Análise de variância para Umidade das camadas de cobertura no décimo e décimo terceiro mês após o plantio

F. V.	GL	QM	
		Umidade (10° mês)	Umidade (13° mês)
Blocos	2	-	-
C <sub>1</sub>	1	0,0000	0,0234**
C <sub>2</sub>	1	0,0007	0,0023
C <sub>3</sub>	1	0,0005	0,0278**
C <sub>4</sub>	1	0,0150**	0,1014**
C <sub>5</sub>	1	0,0067**	0,1176**
C <sub>6</sub>	1	0,0113**	0,0580**
C <sub>7</sub>	1	0,0000	0,0003
C <sub>8</sub>	1	0,0006	0,0000
C <sub>9</sub>	1	0,0182**	0,1040**
C <sub>10</sub>	1	0,0150**	0,0913**
C <sub>11</sub>	1	0,0122**	0,0704**
C <sub>12</sub>	1	0,0030°	0,0024
Resíduo	24	0.0008	0.0012
CV (%)		44,45	20,39

Quadro 22. Contrastes médios e sua significância para Umidade no décimo e no décimo terceiro mês após o plantio nas camadas de cobertura

Contraste	Contrastes Médios	
	Umidade (10° mês)	Umidade (13° mês)
	kg kg <sup>-1</sup>	
C <sub>1</sub>	0,04	0,09**
C <sub>2</sub>	0,01	0,01
C <sub>3</sub>	0,00	-0,02**
C <sub>4</sub>	0,05**	0,13**
C <sub>5</sub>	0,07**	0,28**
C <sub>6</sub>	0,01**	0,03**
C <sub>7</sub>	-0,01	-0,02
C <sub>8</sub>	0,03	-0,01
C <sub>9</sub>	0,11**	0,27**
C <sub>10</sub>	0,05**	0,12**
C <sub>11</sub>	0,09**	0,21**
C <sub>12</sub>	-0,06°	-0,05
CV (%)	44,45	20,39

°, \*, \*\*: Significativo a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.

C1 (T1 vs T2+T3+T4+T5+T6+T7+T8+T9+T10+T11+T12+T13); C2 (T2+T3+T4+T5+T6+T7 vs T8+T9+T10+T11+T12+T13); C3 (T2+T3+T4+T5 vs T6+T7); C4 (T2 vs T3); C5 (T4 vs T5); C6 (T6 vs T7); C7 (T2+T3 vs T4+T5); C8 (T8+T9+T10+T11 vs T12+T13); C9 (T8 vs T9); C10 (T10 vs T11); C11 (T12 vs T13) e C12 (T8+T9 vs T10+T11)

### 2.3.1.3. Caracterização mineralógica

Na fração areia do solo utilizado na camada de cobertura foram observados apenas picos de quartzo, mineral primário normalmente encontrado em Latossolos devido a maior resistência deste mineral ao intemperismo. Já na fração silte, foram observados picos dos minerais quartzo e muscovita. Os minerais encontrados na fração argila foram gibbsita, goethita, caulinita, muscovita, hematita e biotita (Figura 2). A presença de óxidos de ferro na fração argila do solo é importante na medida em que estes minerais são responsáveis por conferir maior capacidade de adsorção de ânions e metais pesados aos solos, sobretudo o arsênio, tornando-o menos disponível para as plantas.

A maior capacidade de adsorção de arsênio pelo solo está relacionada à presença de óxidos de ferro em sua estrutura, os quais possuem cargas negativas para pH normalmente encontrados nos solos brasileiros e alta superfície específica, sendo, portanto, capazes de adsorver ânions ou metais pesados (FENG *et al.*, 2013).

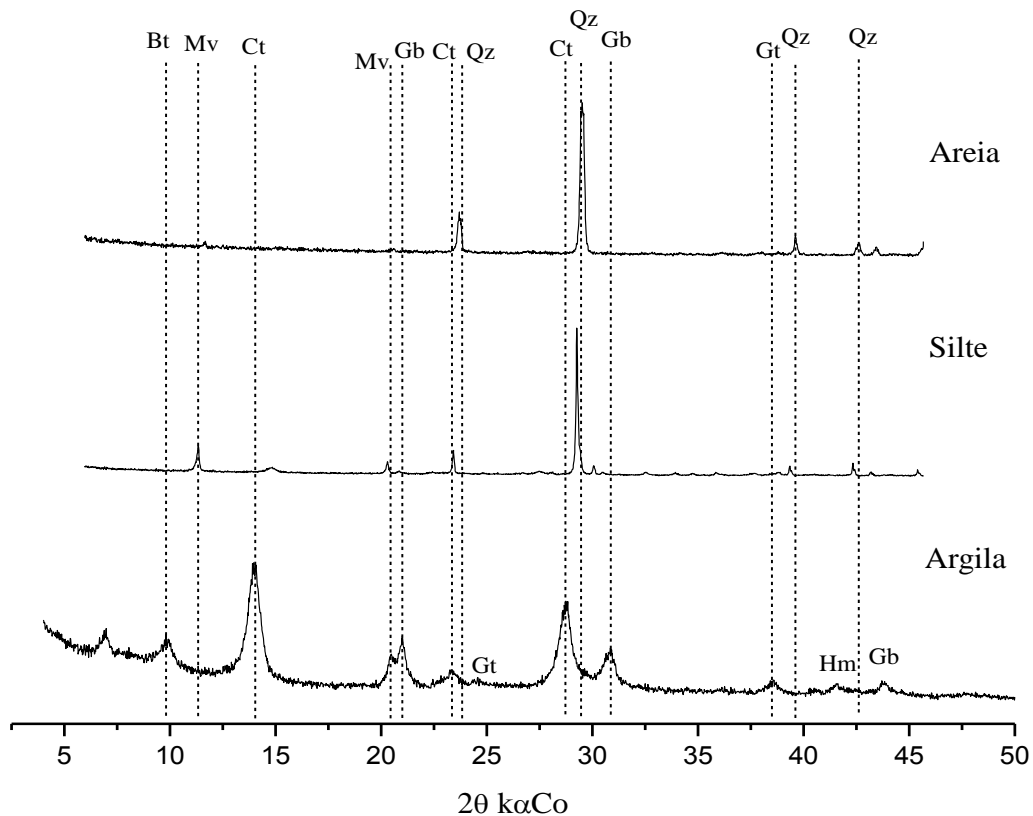


Figura 2. Difratoograma de Raios-X para o solo utilizado na camada de cobertura dos tratamentos. Radiação  $\alpha\text{Co}$ .

Qz: quartzo; Mv: muscovita; Bt: biotita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Hm: hematita; Ct: caulinita.

Na amostra de substrato B1 foram encontrados picos dos minerais quartzo, muscovita (Figura 3). Estes minerais são formadores da rocha filito, material de origem do substrato B1. Picos de minerais como pirita e arsenopirita não foram encontrados, devido ao alto grau de intemperismo do substrato B1 e à baixa concentração destes no material. Tal fato pode ser observado com base nos teores totais deste elemento no B1. Baixos valores de enxofre ocorreram devido à sua mobilidade, o que favorece sua lixiviação e consequente perda ao longo do tempo.

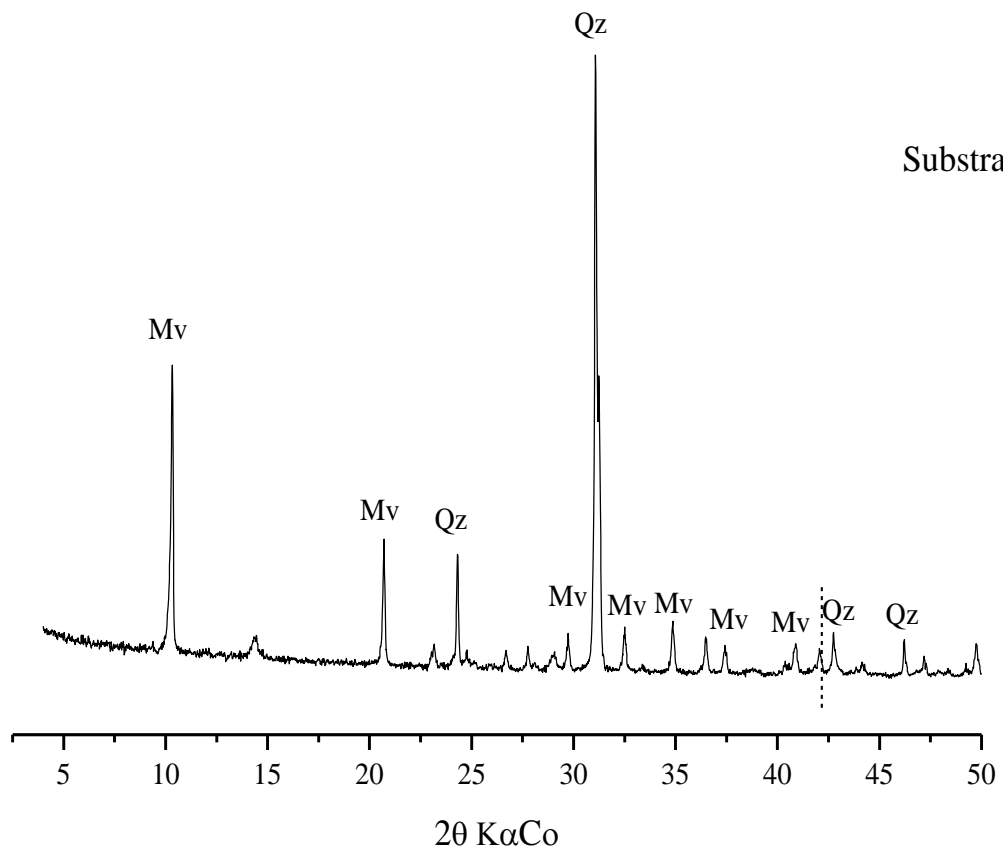


Figura 3. Difratograma de Raios-X para o substrato B1 utilizado na camada de cobertura dos tratamentos. Radiação  $K\alpha Co$ .

Qz: quartzo; Mv: muscovita.

## 2.3.2. Camada Selante

### 2.3.2.1. Caracterização química

Quando comparados aos tratamentos que continham solo e substrato B1 na camada de cobertura e na camada selante (T<sub>2</sub>, T<sub>5</sub>, T<sub>8</sub>, T<sub>11</sub>), os teores médios de arsênio total nas camadas selantes dos tratamentos que continham B1 em todas as camadas (T<sub>4</sub> e T<sub>10</sub>) foram maiores (Quadro 23). Tal fato pode estar relacionado à diluição dos teores deste elemento ao longo das camadas de solo e substrato.

Quadro 23. Teores médios de Arsênio (As), Ferro (Fe) e Enxofre (S) total nas camadas selantes no quinto mês

Tratamento		As	Fe	S
		g kg <sup>-1</sup>		
T1	(-)	0,82	41,60	1,50
T2	(B1/So/Br)	0,07	54,63	1,07
T3	(So/So/Br)	0,01	48,78	0,62
T4	(B1/B1/Br)	0,72	38,57	1,89
T5	(So/B1/Br)	0,69	45,05	2,74
T6	(B1/-/Br)	-	-	-
T7	(So/-/Br)	-	-	-
T8	(B1/So/Lt)	0,09	56,23	0,98
T9	(So/So/Lt)	0,01	51,00	0,85
T10	(B1/B1/Lt)	1,00	36,21	0,67
T11	(So/B1/Lt)	0,63	41,76	1,42
T12	(B1/-/Lt)	-	-	-
T13	(So/-/Lt)	-	-	-

Observou-se diferença significativa entre teores de As e Fe total entre os tratamentos que continham solo ou substrato B1 na camada selante (Quadro 24) (C<sub>7</sub> e C<sub>12</sub>). Os teores de arsênio total foram em média 1,33 g kg<sup>-1</sup> a mais nos T<sub>4</sub> (B1/B1/Br) e T<sub>5</sub> (So/B1/Br) do que nos T<sub>2</sub> (B1/So/Br) e T<sub>3</sub> (So/So/Br) (Quadro 25). Já a média para ferro total foi de 9,35 g kg<sup>-1</sup> a mais nos T<sub>2</sub> (B1/So/Br) e T<sub>3</sub> (So/So/Br), os quais eram formados por solo na camada selante. Do mesmo modo, os teores de arsênio total nos T<sub>10</sub> (B1/B1/Lt) e T<sub>11</sub> (So/B1/Lt) foram em média 1,53 g kg<sup>-1</sup> a mais do que nos T<sub>8</sub> (B1/So/Lt) e T<sub>9</sub> (So/So/Lt). Os teores totais de ferro foram 29,26 g kg<sup>-1</sup> a mais nos T<sub>8</sub> e T<sub>9</sub>. Dessa

forma, observaram-se maiores teores de ferro no solo devido principalmente à sua composição por óxidos de ferro (hematita e goethita) e maiores teores de arsênio no substrato B1.

Observaram-se teores médios de ferro total próximos entre o solo e o substrato B1 (Quadro 23), o que também foi observado por Assis (2006). Estes valores foram altos, sendo de grande importância devido à capacidade deste solo em adsorver arsênio evitando que este esteja disponível na solução do solo para a absorção pelas plantas.

Quadro 24. Análise de variância As, Fe e S total nas camadas selantes no quinto mês

F. V.	GL	QM		
		As	Fe	S
Blocos	2	-	-	-
C <sub>1</sub>	1	0,8521**	310,19**	1,1670
C <sub>2</sub>	1	0,0125	0,84	1,4440
C <sub>3</sub>	1	0,5625**	8745,37**	10,0067*
C <sub>4</sub>	1	0,0054	51,39	0,3038
C <sub>5</sub>	1	0,0011	62,99	1,0838
C <sub>6</sub>	1	0,0000	0,0000	0,0000
C <sub>7</sub>	1	1,3200**	293,83**	6,5121°
C <sub>8</sub>	1	0,7425**	8575,07**	3,8481
C <sub>9</sub>	1	0,0113	40,93	0,0254
C <sub>10</sub>	1	0,2054*	46,15	0,8363
C <sub>11</sub>	1	0,0000	0,0000	0,0000
C <sub>12</sub>	1	1,7404**	641,96**	0,0520
Resíduo	24	0,0465	25,01	1,7837
CV (%)		69,30	15,71	147,72

Ao avaliar os teores de arsênio disponível nas camadas selantes observou-se diferença significativa quando o substrato B1 foi utilizado na camada selante e solo ou substrato B1 compôs a camada de cobertura (C<sub>5</sub> e C<sub>10</sub>) (Quadro 27). O teor de arsênio disponível foi em média 9,33 mg dm<sup>-3</sup> a mais no T<sub>4</sub> (B1/B1/Br) em relação ao T<sub>5</sub> (So/B1/Br) e 5,15 mg dm<sup>-3</sup> a mais no T<sub>10</sub> (B1/B1/Lt) em relação ao T<sub>11</sub> (So/B1/Lt) (Quadro 26). A presença de substrato B1 na camada de cobertura pode ter favorecido maior lixiviação de arsênio, o que promoveu o aumento dos teores disponíveis deste elemento na camada selante.



Quadro 25. Contrastes médios e sua significância para valores de As, Fe e S total nas camadas selantes no quinto mês

Contraste	Contrastes Médios		
	As	Fe	S
		g kg <sup>-1</sup>	
C <sub>1</sub>	-0,55**	-10,58**	-0,65
C <sub>2</sub>	0,03	-0,20	-0,27
C <sub>3</sub>	-0,08**	-9,35**	-0,32*
C <sub>4</sub>	-0,03	-2,93	-0,22
C <sub>5</sub>	-0,03	6,48	0,85
C <sub>6</sub>	0,00	0,00	0,00
C <sub>7</sub>	1,33**	-19,79**	2,95°
C <sub>8</sub>	-0,86**	-92,60**	-1,96
C <sub>9</sub>	-0,09	-5,22	-0,13
C <sub>10</sub>	-0,18*	2,77	0,37
C <sub>11</sub>	0,00	0,00	0,00
C <sub>12</sub>	1,53**	-29,26**	0,27
CV (%)	69,30	15,71	147,72

°, \*, \*\*: Significativo a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.

C<sub>1</sub> (T<sub>1</sub> vs T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>+T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>2</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub> vs T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>3</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub> vs T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>); C<sub>4</sub> (T<sub>2</sub> vs T<sub>3</sub>); C<sub>5</sub> (T<sub>4</sub> vs T<sub>5</sub>); C<sub>6</sub> (T<sub>6</sub> vs T<sub>7</sub>); C<sub>7</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub> vs T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>); C<sub>8</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub> vs T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>9</sub> (T<sub>8</sub> vs T<sub>9</sub>); C<sub>10</sub> (T<sub>10</sub> vs T<sub>11</sub>); C<sub>11</sub> (T<sub>12</sub> vs T<sub>13</sub>) e C<sub>12</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub> vs T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>)

Quadro 26. Teores médios de Arsênio (As), Ferro (Fe) e Enxofre (S) disponível nas camadas selantes no quinto mês após o plantio

Tratamento	As <sup>1</sup>	Fe <sup>1</sup>	S <sup>2</sup>
	mg dm <sup>-3</sup>		
T <sub>1</sub> (-)	9,39	495,68	178,23
T <sub>2</sub> (B1/So/Br)	0,57	106,95	174,10
T <sub>3</sub> (So/So/Br)	0,38	233,13	17,67
T <sub>4</sub> (B1/B1/Br)	12,78	609,72	196,20
T <sub>5</sub> (So/B1/Br)	3,45	259,51	64,70
T <sub>6</sub> (B1/-/Br)	-	-	-
T <sub>7</sub> (So/-/Br)	-	-	-
T <sub>8</sub> (B1/So/Lt)	0,44	111,25	162,70
T <sub>9</sub> (So/So/Lt)	0,66	277,53	15,33
T <sub>10</sub> (B1/B1/Lt)	12,55	419,15	113,90
T <sub>11</sub> (So/B1/Lt)	2,25	323,05	61,47
T <sub>12</sub> (B1/-/Lt)	-	-	-
T <sub>13</sub> (So/-/Lt)	-	-	-

<sup>1</sup> Extrator Mehlich III

<sup>2</sup> Extrator Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 500 mg L<sup>-1</sup> de P, em HOAc 2 mol L<sup>-1</sup>

Quadro 27. Análise de variância As, Fe e S disponíveis nas camadas selantes no quinto mês

F. V.	GL	QM		
		As	Fe	S
Blocos	2	-	-	-
C <sub>1</sub>	1	121,69**	250320,26*	34222,23**
C <sub>2</sub>	1	0,4053	1534,28	2433,78
C <sub>3</sub>	1	73,82**	365613,71**	51151,36**
C <sub>4</sub>	1	0,0561	23884,61	36660,17**
C <sub>5</sub>	1	130,57**	183974,07*	25872,67*
C <sub>6</sub>	1	0,00	0,0000	0,0000
C <sub>7</sub>	1	175,03**	210007,73*	3570,7500
C <sub>8</sub>	1	63,28**	319778,94**	31270,03*
C <sub>9</sub>	1	0,0748	41475,22	32413,50*
C <sub>10</sub>	1	159,13**	13853,78	4160,67
C <sub>11</sub>	1	0,0000	0,0000	0,00
C <sub>12</sub>	1	140,84**	93675,74	6,75
Resíduo	24	3,0579	40231,30	4225,4850
CV (%)		53,51	91,94	85,85

Quadro 28. Contrastes médios e sua significância para valores de As e S disponíveis nas camadas selantes no quinto mês

Contraste	Contrastes Médios		
	As	Fe	S
		mg dm <sup>-3</sup>	
C <sub>1</sub>	-6,63**	-300,65*	-111,06**
C <sub>2</sub>	-0,14	-8,70	-11,03
C <sub>3</sub>	-0,86**	-60,47**	-22,63**
C <sub>4</sub>	-0,10	63,09	-78,22**
C <sub>5</sub>	-9,33**	-350,21*	-131,5*
C <sub>6</sub>	0,00	0,00	0,00
C <sub>7</sub>	15,28**	529,16*	69,13
C <sub>8</sub>	-7,95**	-565,49**	-176,70*
C <sub>9</sub>	0,22	166,28	-147,37*
C <sub>10</sub>	-5,15**	-48,05	-26,22
C <sub>11</sub>	0,00	0,00	0,00
C <sub>12</sub>	13,70**	353,41	-2,67
CV (%)	53,51	91,94	85,85

°, \*, \*\*: Significativo a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.

C<sub>1</sub> (T<sub>1</sub> vs T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>+T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>2</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub> vs T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>3</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub> vs T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>); C<sub>4</sub> (T<sub>2</sub> vs T<sub>3</sub>); C<sub>5</sub> (T<sub>4</sub> vs T<sub>5</sub>); C<sub>6</sub> (T<sub>6</sub> vs T<sub>7</sub>); C<sub>7</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub> vs T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>); C<sub>8</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub> vs T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>9</sub> (T<sub>8</sub> vs T<sub>9</sub>); C<sub>10</sub> (T<sub>10</sub> vs T<sub>11</sub>); C<sub>11</sub> (T<sub>12</sub> vs T<sub>13</sub>) e C<sub>12</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub> vs T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>)

## **2.1. CONCLUSÃO**

A presença de camada selante favorece a manutenção da umidade na camada de cobertura em virtude da menor drenagem promovida nestes tratamentos. Dessa forma menor quantidade de água atinge o material sulfetado e maior é a sua disponibilidade para a vegetação

O solo apresenta tanto condições físicas quanto químicas mais favoráveis ao crescimento de plantas em relação ao substrato B1, seja pela maior capacidade de armazenamento de água, menor densidade ou pelos menores teores de arsênio e enxofre disponíveis.

A utilização de laterita na camada de quebra de capilaridade é mais favorável para a retenção de arsênio evitando que este atinja as camadas de cobertura. Porém são necessárias outras avaliações ao longo do tempo para observar o comportamento deste elemento e a eficiência desta camada em função das variações pluviométricas das estações do ano.

## **CAPÍTULO 3**

*Atividade microbiana, biomassa vegetal e teores foliares em diferentes formas de cobertura do substrato sulfetado*

### 3.1. INTRODUÇÃO

Apesar de possuírem grande importância econômica, as atividades de extração mineral são responsáveis por inúmeros impactos ambientais. Grande parte destas é realizada por meio da remoção da camada superficial do solo, deixando expostos substratos que dificultam o processo de regeneração natural da vegetação. Esta dificuldade está relacionada à estrutura ruim do substrato, à falta de nutrientes e matéria orgânica, o que ocasiona a redução da atividade microbiana nestas áreas (VARENNES, *et al.*, 2011).

A matéria orgânica do solo (MOS) faz parte da fração orgânica do solo e geralmente não inclui raízes das plantas, macrofauna e resíduos de plantas não degradados. Ela fornece nutrientes para o crescimento das plantas, contribui com a capacidade de troca catiônica assim como mantém a fertilidade do solo, além de promover a formação e estabilização da estrutura do solo por atuar tanto no processo de agregação, através de interações entre seus grupos funcionais carboxila e hidroxila com a superfície de partículas minerais de tamanho argila, como na formação do espaço poroso (LUO & ZHOU, 2006 e VEZZANI *et al.*, 2008).

A avaliação da atividade microbiana tem sido muito utilizada como indicador de qualidade em áreas degradadas pela mineração e em recuperação, pois permite obter uma resposta mais rápida às alterações nas propriedades orgânicas do solo ou substrato. Esta avaliação é realizada principalmente pelo método da respirometria, também denominado de evolução de C-CO<sub>2</sub> ou C mineralizável, que determina a respiração microbiana ou respiração basal no substrato degradado (GUIMARÃES, 2010). Não obstante, a atividade microbiana pode ser um indicador sensível tanto para revelar a toxicidade por metais pesados em ambientes naturais quanto para avaliar o estresse causado pela presença de metais pesados no meio, sobretudo em áreas de mineração (LIAO & XIE, 2007 e NIEMEYER *et al.*, 2012).

Dentre as diversas formas de exploração mineral existentes, a mineração de ouro é uma atividade potencialmente impactante e pode ocorrer tanto de forma subterrânea, quanto por aluvião ou a céu aberto. Quando se trata da exploração a céu aberto, devido à retirada da camada superficial do solo e da cobertura vegetal, ocorre a exposição de materiais com elevados teores de sulfetos, metais pesados e metaloides, como cádmio e

arsênio, respectivamente. Devido às condições hostis deste material, além da possibilidade de geração de drenagem ácida, a revegetação destas áreas torna-se complexa, exigindo técnicas dispendiosas e eficientes para o estabelecimento das espécies vegetais.

Dessa forma, por meio da incorporação de espécies vegetais nestas áreas buscase, sobretudo, o aporte de material orgânico e a proteção do substrato de modo a favorecer a atividade de microrganismos e dar início ao processo da ciclagem de nutrientes, que exerce papel fundamental na sustentabilidade do sistema em recuperação. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a atividade microbiana, a biomassa vegetal produzida e teores foliares de nutrientes e metais pesados em diferentes coberturas de substrato sulfetado remanescente de exploração de ouro.

## **3.2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **Caracterização da área em estudo**

A área em estudo localiza-se na cidade de Paracatu, Minas Gerais, no Morro do Ouro, onde ocorre atualmente exploração de ouro e prata pela empresa Kinross Brasil Mineração. A cidade de Paracatu encontra-se na latitude 17°13'20" S e longitude 46°52'29" W estando localizada a 688 m de altitude e a área da jazida entre 645 e 837 m. Nesta região há o predomínio de rochas sedimentares e metassedimentares de ambiente marinho raso a profundo das formações Vazante e Paracatu, as quais pertencem ao grupo Bambuí (COSTA, 1970).

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região de Paracatu pertence ao tipo Aw – clima tropical com estação seca no inverno, de abril a setembro, e o período chuvoso ocorrendo no verão, de outubro a março. A temperatura média anual varia entre 21°C e 24°C. A pluviosidade média anual é de aproximadamente 1390 mm (HENDERSON, 2006).

Predomina na região a vegetação do tipo cerrado, típica do Brasil-Central, caracterizada pela presença de três estratos: arbóreo, arbustivo e herbáceo (SOUZA, 1978).

## Descrição do Experimento

O experimento foi instalado sobre um tanque específico desativado, o qual recebia rejeito concentrado com teores elevados de sulfato, um dos produtos do beneficiamento do minério. Este tanque foi impermeabilizado em sua base com argila e polietileno de alta densidade e, da mesma forma, ao final de sua vida útil realizou-se a impermeabilização da superfície.

Inicialmente, pilhas de minério B2 (substrato sulfetado) foram confeccionadas na área utilizada para montagem do experimento. Para o recobrimento destas pilhas foi instalado um ensaio adotando-se o modelo de três camadas (Figura 1), composto por camada de cobertura, camada de selamento e camada de quebra de capilaridade, as quais possuem diferentes materiais.

Os materiais utilizados para montagem do experimento compreenderam:

- Substrato B2: é o minério (filito) contendo teores de sulfetos da ordem de 10,0 g kg<sup>-1</sup>, com granulometria de calhau a argila, pouco intemperizado. Este material possui maior quantidade de sulfetos e, portanto, apresenta maior risco de produzir drenagem ácida.

- Substrato B1: é o minério (filito) contendo teores de sulfetos da ordem de 3,0 g kg<sup>-1</sup>, com granulometria de calhau a argila, muito intemperizado.

- Laterita: material composto por concreções ferruginosas encontrado em alguns locais dentro da área de estudo.

- Solo: camada superficial de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, também encontrado dentro da área de estudo, em áreas de empréstimo localizadas próximas ao experimento.

- Brita: brita calcária com granulometria entre 9,5 mm e 19 mm.

A diferente disposição destes materiais resultou em um experimento com 12 tratamentos e um tratamento adicional (testemunha). Dessa forma, obteve-se um esquema fatorial (1 x 1 x 1) + (2 x 3 x 2), no qual foram testados dois materiais como camada de quebra de capilaridade; dois como camada selante e ausência da mesma; dois como camada de cobertura; mais um tratamento (controle) que consiste em um único material

constituindo as três camadas (Quadro 1). Foi adotado o delineamento experimental em blocos casualizados com três repetições, totalizando 39 parcelas experimentais, sendo cada parcela com as dimensões de 20 x 10 m.

Figura 1. Representação esquemática das diferentes camadas de recobrimento



Quadro 1. Descrição dos tratamentos implantados no experimento de campo com substrato B2

Tratamento	Camada		
	Quebra de capilaridade (10 cm)	Selante (20 cm)	Cobertura (20 cm)
1 (-)	B1	B1	B1
2 (B1/So/Br)	Brita calcária	Solo	B1
3 (So/So/Br)	Brita calcária	Solo	Solo
4 (B1/B1/Br)	Brita calcária	B1	B1
5 (So/B1/Br)	Brita calcária	B1	Solo
6 (B1/-/Br)	Brita calcária	-	B1
7 (So/-/Br)	Brita calcária	-	Solo
8 (B1/So/Lt)	Laterita	Solo	B1
9 (So/So/Lt)	Laterita	Solo	Solo
10 (B1/B1/Lt)	Laterita	B1	B1
11 (So/B1/Lt)	Laterita	B1	Solo
12 (B1/-/Lt)	Laterita	-	B1
13 (So/-/Lt)	Laterita	-	Solo



## Plantio e adubação

Para o plantio, foram selecionadas espécies herbáceas, nativas de cerrado e exóticas com sistema radicular fasciculado ou, se pivotante, sensível a compactação (Quadro 2).

Quadro 2. Relação das espécies utilizadas no experimento e quantidade de sementes utilizadas

Espécies	Quantidade de sementes	Origem	Porte	Sistema Radicular
	kg ha <sup>-1</sup>	-	-	-
<i>Melinis minutiflora</i> P. Beauv (capim gordura)	35	Exótica	Forageira	Fasciculado
<i>Stizolobium aterrimum</i> Piper & Tracy (mucuna preta)	35	Exótica	Leguminosa Herbácea	Pivotante
<i>Lolium multiflorum</i> Lam. (azevém)	15	Exótica	Forageira Herbácea	Fasciculado
<i>Crotalaria spectabilis</i> Roth. (crotalaria)	35	Exótica	Leguminosa Herbácea	Pivotante
<i>Stylosanthes spp.</i> – <i>Stylosanthes capitata</i> Vogel e S. <i>macrocephala</i> M. B. Ferr. et S. Costa – (estilosante)	2	Nativa	Forageira Herbácea	Fasciculado

Para o semeio da mistura de espécies, realizado em dezembro de 2011, foram abertos sulcos em cada parcela no sentido transversal de cada bloco, espaçados em 30 cm.

Em cada uma das parcelas com solo como cobertura foram aplicados 2,6 t ha<sup>-1</sup> de calcário (PRNT = 100 %) e nas parcelas com substrato B1 como cobertura, 1,4 t ha<sup>-1</sup> de calcário um mês antes da adubação. A adubação foi realizada com 1,0 t ha<sup>-1</sup> de NPK 8-28-16 mais micronutrientes no plantio. A adubação de cobertura foi realizada com 0,85 t

ha<sup>-1</sup> de NPK 20-00-20 e micronutrientes. Esta adubação foi realizada em duas etapas, sendo a primeira 20 dias após o plantio e a segunda 45 dias após.

### **Biomassa Vegetal**

A caracterização da biomassa produzida foi realizada aos cinco e aos treze meses após o plantio (maio de 2012 e janeiro de 2013). O material vegetal existente em cada parcela foi avaliado quanto à biomassa produzida por meio de três lançamentos ao acaso de gabarito de 0,16 m<sup>2</sup> em cada parcela. Todo material presente dentro deste quadrado foi coletado, armazenado em sacos de papel e seco em estufa de ar com circulação forçada a 60 °C por 48 h. Este material foi pesado em balança com aproximação de 0,01 g para determinação da massa seca. Posteriormente foi moído em moinho do tipo Wiley e então, submetido à digestão nitroperclórica conforme metodologia proposta por TEDESCO et al. (1995) para a quantificação dos teores de P, K, S, Fe, Zn, Mn, Mg, Ca e As por meio de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado.

### **Atividade microbiana no solo**

A atividade microbiana foi avaliada, aos dez e treze meses após o plantio, nas camadas de cobertura (solo e substrato B1) por meio da determinação dos teores de carbono orgânico total, carbono na biomassa microbiana (ISLAM & WEIL, 1998) e pela respiração basal (STOTZKY, 1965). Com base nestes dados foram gerados o quociente metabólico ( $C_{\text{Respiração Basal}}/C_{\text{Biomassa}}$ ) e o quociente microbiano ( $C_{\text{Biomassa}}/C_{\text{Orgânico}} \times 100$ ). Em cada parcela, foram retiradas três amostras simples para formar uma amostra composta. As coletas foram realizadas em dois períodos diferentes ao longo do ano, uma no final do período seco (outubro de 2012) e outra no meio do período chuvoso (janeiro de 2013).

O carbono orgânico total foi determinado por digestão das amostras com dicromato de potássio e ácido sulfúrico concentrado, com fonte externa de calor (YEOMANS & BREMNER, 1988). O teor de matéria orgânica foi determinado a partir da multiplicação do teor de C orgânico, pelo fator de “Van Bemmelen” (1,724) (MENDONÇA & MATOS, 2005).

Para avaliação da respiração microbiana, foi utilizado o método respirométrico de avaliação do C-CO<sub>2</sub> evoluído do solo/substrato (RBS), no qual amostras de 100 g de solo/substrato úmido (70% da capacidade de campo) e peneirado em peneira de malha de

4 mm foram incubadas durante 15 dias em frascos hermeticamente fechados. O C-CO<sub>2</sub> liberado do substrato/solo foi carregado por fluxo contínuo de ar (isento de CO<sub>2</sub>) até outro frasco contendo 100 mL de solução de NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>, ao final de 15 dias de incubação estimou-se o C-CO<sub>2</sub> evoluído a partir da titulação de 10 mL da solução de NaOH com solução de HCl 0,5 mol L<sup>-1</sup>. Para o controle da qualidade do ar carregado, foram utilizados brancos em frascos sem solo. A quantidade de CO<sub>2</sub> evoluído do material foi calculada pela equação 1.

$$RBS (mg CO_2 kg^{-1} solo d^{-1}) = ((V_b - V_a) \cdot M \cdot 22 \cdot 1000) / (P_s \cdot T) \quad (1)$$

onde V<sub>b</sub> (mL) = Volume de HCl gasto na titulação do branco, V<sub>a</sub> = Volume de HCl gasto na titulação da amostra, M = molaridade exata do HCl, P<sub>s</sub> (g) = massa do solo/substrato, 22 = eficiência de captura de CO<sub>2</sub> pelo NaOH e T = tempo de incubação da amostra em horas.

Após 15 dias de incubação, o material foi retirado dos frascos, tomando-se 18 g de cada frasco, em duplicata, para determinação do carbono da biomassa microbiana (CBM). Utilizou-se o método descrito por VANCE et al. (1987), modificado por ISLAM & WEIL (1998), no qual metade das amostras foram tratadas com radiação de micro-ondas por tempo previamente calculado (60 + 60 s) e a outra metade não recebeu radiação. O CBM foi extraído das amostras irradiadas e não irradiadas com 80 mL da solução de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; em seguida, as amostras foram submetidas à agitação por 30 min, em mesa agitadora horizontal, permanecendo posteriormente em repouso por 30 min. Após o repouso, o sobrenadante foi filtrado em filtros de papel Whatman nº 42. Foram transferidos 10 mL do filtrado para tubo digestor, aos quais se adicionaram 2 mL de solução de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 0,0667 mol L<sup>-1</sup> e 10 mL de solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> P.A. Após deixá-los esfriar, o volume foi completado para 100 mL em proveta calibrada com água destilada. As amostras foram transferidas para frascos erlenmeyers de 250 mL, adicionando-se o indicador Ferroin (oito gotas), sendo titulado com solução 0,033 mol L<sup>-1</sup> de Sulfato de ferro II e amônio (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> até mudança da cor para vermelho tijolo. O teor de carbono (C) nos extratos irradiado e não irradiado foi calculado pela equação 2. A partir desses valores, calculou-se o CBM, dado pela equação 3.

$$C (mg C kg^{-1} solo) = ((V_b - V_a) \cdot M \cdot 0,003 \cdot V_1 \cdot 10^6) / (P_s \cdot V_2) \quad (2)$$

onde  $V_b$  (mL) = Volume de  $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$  gasto na titulação do branco,  $V_a$  = Volume de  $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$  gasto na titulação da amostra,  $M$  = molaridade exata do  $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$ ,  $V_1$  = Volume do extrator  $K_2SO_4$ ,  $V_2$  = alíquota pipetada do extrato para titulação, 0,003 = miliequivalente de Carbono,  $P_s$  (g) = massa do solo/substrato.

$$CBM \text{ (mg C microbiano kg}^{-1}\text{ solo)} = FC \cdot k_c^{-1} \quad (3)$$

onde FC = fluxo obtido da diferença entre a quantidade de C recuperada no extrato da amostra irradiada e a recuperada da amostra não irradiada e  $k_c = 0,33$  – fator de conversão do C extraído em C da biomassa microbiana (SPARLING E WEST, 1988).

A partir da relação entre a média do C-CO<sub>2</sub> evoluído do material e o CBM determinado calculou-se o  $qCO_2$  (mg CO<sub>2</sub> mg<sup>-1</sup> C – BMS h<sup>-1</sup>). O  $qMIC$  foi obtido pela relação entre o CBM e o COT.

### **Análise estatística**

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância para os diferentes tratamentos em estudo. Os graus de liberdade dos tratamentos foram desdobrados em contrastes ortogonais de modo a se testar o efeito dos tratamentos. Os coeficientes dos contrastes analisados para o experimento são listados no Quadro 3 e as respectivas descrições no Quadro 4.

Quadro 3. Coeficientes dos contrastes analisados para os tratamentos estudados

Tratamento	Contrastes ortogonais											
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>
1 (-)	-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 (B1/So/Br)	1	-1	-1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0
3 (So/So/Br)	1	-1	-1	1	0	0	-1	0	0	0	0	0
4 (B1/B1/Br)	1	-1	-1	0	-1	0	1	0	0	0	0	0
5 (So/B1/Br)	1	-1	-1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
6 (B1/-/Br)	1	-1	2	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
7 (So/-/Br)	1	-1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8 (B1/So/Lt)	1	1	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	-1
9 (So/So/Lt)	1	1	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	-1
10 (B1/B1/Lt)	1	1	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	1
11 (So/B1/Lt)	1	1	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	1
12 (B1/-/Lt)	1	1	0	0	0	0	0	2	0	0	-1	0
13 (So/-/Lt)	1	1	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0

Quadro 4. Confronto estabelecido e efeito principal de cada contraste

Contraste	Confronto	Efeito Principal
C <sub>1</sub>	Testemunha vs Tratamentos	Tratamentos
C <sub>2</sub>	Brita vs Laterita na camada de quebra de capilaridade	Camada de quebra de capilaridade
C <sub>3</sub>	Presença vs Ausência de camada selante com brita na camada de quebra de capilaridade	Camada selante
C <sub>4</sub>	B1 vs Solo na camada de cobertura, com brita na camada de quebra de capilaridade e com solo na camada selante	Camada de cobertura
C <sub>5</sub>	B1 vs Solo na camada de cobertura, com brita na camada de quebra de capilaridade e com B1 na camada selante	Camada de cobertura
C <sub>6</sub>	B1 vs Solo na camada de cobertura, com brita na camada de quebra de capilaridade na ausência de camada selante	Camada de cobertura
C <sub>7</sub>	B1 vs Solo na camada selante com brita na camada de quebra de capilaridade	Camada selante
C <sub>8</sub>	Presença vs Ausência de camada selante com laterita na camada de quebra de capilaridade	Camada selante
C <sub>9</sub>	B1 vs Solo na camada de cobertura, com laterita na camada de quebra de capilaridade e com solo na camada selante	Camada de cobertura
C <sub>10</sub>	B1 vs Solo na camada de cobertura, com laterita na camada de quebra de capilaridade e com B1 na camada selante	Camada de cobertura
C <sub>11</sub>	B1 vs Solo na camada de cobertura, com laterita na camada de quebra de capilaridade na ausência de camada selante	Camada de cobertura
C <sub>12</sub>	B1 vs Solo na camada selante com laterita na camada de quebra de capilaridade	Camada selante

### **3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.3.1. Atividade microbiana**

##### ***3.3.1.1. Primeira avaliação***

A primeira avaliação foi realizada no final do período seco (outubro de 2012). Por meio da análise descritiva dos resultados (Quadro 5), verificou-se que os valores médios de carbono orgânico total (COT), matéria orgânica (MO) e carbono da biomassa microbiana (BMS-C) foram maiores nas parcelas que receberam solo na camada de cobertura em relação às parcelas que receberam substrato B1.

O solo apresenta maior teor de matéria orgânica do que o substrato B1 devido à decomposição de resíduos vegetais já existentes neste material desde seu local de origem (área de empréstimo). Além disso, o solo favorece o estabelecimento e desenvolvimento das plantas, levando a maior produção de biomassa e, conseqüentemente, incorporação de maior quantidade de matéria orgânica. O substrato B1, por ser oriundo de rocha moída, não possuiu originalmente matéria orgânica, sendo esta incorporada em pequena quantidade após o plantio nas parcelas.

A biomassa microbiana, componente ativo do carbono orgânico do solo, é um importante atributo da qualidade do solo e um indicador sensível de mudanças no carbono orgânico (ZHANG & FANG, 2007). Os valores de carbono na biomassa microbiana (BMS-C) foram maiores nas parcelas que receberam solo na camada de cobertura em relação ao substrato B1. Menores valores da biomassa microbiana no substrato B1 foram conseqüência da menor cobertura vegetal, menor teor de carbono orgânico na superfície e também do maior teor de arsênio presente neste material. Além disso, baixa densidade de vegetação resultou na exposição da biomassa microbiana aos efeitos da chuva e de altas temperaturas, além de promover menor incorporação de matéria orgânica no substrato.

Os valores médios de respiração basal (RBS), quociente metabólico ( $qCO_2$ ) e quociente microbiano ( $qMIC$ ) apresentaram grande variação entre as parcelas. Tal amplitude pode ter sido ocasionada pela grande variabilidade dos resultados entre repetições em função do método de análise utilizado e da variabilidade das características das amostras analisadas. Sendo assim, tais parâmetros apresentaram coeficientes de

variação elevados, prejudicando a análise dos dados quanto a sua significância para os diferentes tratamentos.

Quadro 5. Teores médios de carbono orgânico total (COT) e matéria orgânica (MO), respiração microbiana (RBS), carbono na biomassa microbiana (BMS-C), quociente metabólico ( $qCO_2$ ) e quociente microbiano ( $qMIC$ ) nas camadas de cobertura dos treze tratamentos estudados dez meses após o plantio

Tratamento	COT	MO	RBS	BMS-C	$qCO_2$	$qMIC$
	—dag kg <sup>-1</sup> —		mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg mg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	%
T1 (-)	0,16	0,27	0,39	5,32	0,03	0,64
T2 (B1/So/Br)	0,19	0,33	0,32	5,81	0,09	0,33
T3 (So/So/Br)	1,76	3,04	0,47	29,52	0,02	0,17
T4 (B1/B1/Br)	0,19	0,33	0,48	4,84	0,12	0,34
T5 (So/B1/Br)	1,78	3,08	0,50	29,57	0,02	0,17
T6 (B1-/Br)	0,15	0,27	0,18	8,23	0,04	0,56
T7 (So-/Br)	1,52	2,62	0,67	20,33	0,03	0,14
T8 (B1/So/Lt)	0,29	0,49	0,35	4,36	0,04	0,18
T9 (So/So/Lt)	1,75	3,01	0,32	37,27	0,01	0,22
T10 (B1/B1/Lt)	0,21	0,36	0,24	4,36	0,01	0,35
T11 (So/B1/Lt)	1,70	2,94	0,44	18,39	0,02	0,11
T12 (B1-/Lt)	0,24	0,42	0,38	6,78	0,01	0,21
T13 (So-/Lt)	1,40	2,41	0,64	33,40	0,02	0,28

Pode-se observar que devido à situação de estresse na qual se encontram tanto o solo quanto o substrato, a relação entre RBS e BMS-C ( $qCO_2$ ) apresentou valores altos, sendo estes relativamente maiores para o substrato B1. Tal condição reflete a vulnerabilidade da comunidade microbiana com altas taxas de respiração em resposta à condição do substrato B1, ou seja, há maior competição entre os microrganismos do substrato por pequena quantidade de carbono disponível. Liao & Xie (2007) observaram valores menores de  $qCO_2$  em áreas com elevada concentração de metais pesados. Foram encontrados valores da ordem de  $0,00285 \text{ h}^{-1}$  para a amostra com maiores teores de cobre, zinco e chumbo. Apesar da condição de estresse dessa área é possível observar que, no substrato B1, as condições são ainda mais limitantes para a comunidade microbiana, uma vez que os valores de  $qCO_2$  foram muito maiores.



A relação entre BMS-C e COT (qMIC) foi baixa para todos tratamentos, evidenciando a menor eficiência dos microrganismos na utilização do substrato, ou seja, maior quantidade de carbono foi consumida e pouco carbono foi incorporado aos tecidos da biomassa microbiana.

Quadro 6. Análise de variância para carbono orgânico total (COT) e matéria orgânica (MO), respiração microbiana (RBS), carbono na biomassa microbiana (BMS-C), quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>) e quociente microbiano (qMIC) nas camadas de cobertura dos treze tratamentos estudados dez meses após o plantio

F. V.	GL	QM					
		COT	MO	RBS	BMS-C	qCO <sub>2</sub>	qMIC
Blocos	2	-	-	-	-	-	-
C <sub>1</sub>	1	1,6872**	4,9436**	0,0025	371,38°	0,0000	0,4134°
C <sub>2</sub>	1	0,0001	0,0001	0,0156	9,71	0,0090*	0,0306
C <sub>3</sub>	1	0,0857	0,2483	0,0015	39,92	0,0036	0,0407
C <sub>4</sub>	1	3,7288**	11,0433**	0,0353	843,96**	0,0088*	0,0384
C <sub>5</sub>	1	3,8081**	11,2888**	0,0004	917,85**	0,0160**	0,0468
C <sub>6</sub>	1	2,7880**	8,3308**	0,3601*	219,49	0,0000	0,2563
C <sub>7</sub>	1	0,0004	0,0014	0,0271	0,63	0,0005	0,0001
C <sub>8</sub>	1	0,1067	0,3230	0,1167	63,76	0,0000	0,0051
C <sub>9</sub>	1	3,2120**	9,5508**	0,0013	1624,60**	0,0017	0,0024
C <sub>10</sub>	1	3,3600**	9,9331**	0,0600	295,40°	0,0004	0,0888
C <sub>11</sub>	1	1,9953**	5,9401**	0,1014	1062,67**	0,0001	0,0088
C <sub>12</sub>	1	0,0096	0,0290	0,0002	267,25	0,0004	0,0030
Resíduo	24	0,0447	0,1335	0,0675	96,9113	0,0015	0,1178
CV (%)		24,21	24,25	62,64	61,48	110,39	121,12

Quadro 7. Contrastes médios e sua significância para valores de carbono orgânico total (COT) e matéria orgânica (MO), respiração microbiana (RBS), carbono na biomassa microbiana (BMS-C), quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>) e quociente microbiano (qMIC) nas camadas de cobertura dos treze tratamentos estudados dez meses após o plantio

Contraste	Contrastes Médios					
	COT	MO	RBS	BMS-C	qCO <sub>2</sub>	qMIC
	—dag kg <sup>-1</sup> —		mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg mg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	%
C <sub>1</sub>	0,78**	1,34**	0,03	11,58°	0,00	-0,39°
C <sub>2</sub>	0,00	0,00	-0,03	0,69	-0,02*	-0,04
C <sub>3</sub>	-0,03	-0,05	0,00	-0,63	-0,01	0,02
C <sub>4</sub>	0,79**	1,36**	0,08	11,86**	-0,04*	-0,08
C <sub>5</sub>	1,59**	2,74**	0,02	24,73**	-0,11**	-0,17
C <sub>6</sub>	0,23**	0,39**	0,08*	2,02	0,00	-0,07
C <sub>7</sub>	0,02	0,04	0,20	-0,92	0,03	0,01
C <sub>8</sub>	-0,33	-0,57	0,34	7,99	-0,01	0,07
C <sub>9</sub>	1,46**	2,52**	-0,03	32,91**	-0,03	0,04
C <sub>10</sub>	0,75**	1,29**	0,10	7,02°	0,01	-0,12
C <sub>11</sub>	1,15**	1,99**	0,26	26,62**	0,01	0,07
C <sub>12</sub>	-0,12	-0,20	0,02	-18,88	-0,02	0,06
CV (%)	24,21	24,25	62,64	61,48	110,39	121,12

°, \*, \*\*: Significativo a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.

C<sub>1</sub> (T<sub>1</sub> vs T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>+T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>2</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub> vs T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>3</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub> vs T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>); C<sub>4</sub> (T<sub>2</sub> vs T<sub>3</sub>); C<sub>5</sub> (T<sub>4</sub> vs T<sub>5</sub>); C<sub>6</sub> (T<sub>6</sub> vs T<sub>7</sub>); C<sub>7</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub> vs T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>); C<sub>8</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub> vs T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>9</sub> (T<sub>8</sub> vs T<sub>9</sub>); C<sub>10</sub> (T<sub>10</sub> vs T<sub>11</sub>); C<sub>11</sub> (T<sub>12</sub> vs T<sub>13</sub>) e C<sub>12</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub> vs T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>)

### 3.3.1.2. Segunda avaliação

A segunda avaliação ocorreu no meio do período chuvoso (janeiro de 2013). Foi observada pouca diferença no incremento dos teores de COT e MOS, devido ao pequeno intervalo de tempo entre as coletas e também à menor quantidade de chuvas nesse período entre as amostragens. Observou-se redução de carbono na biomassa microbiana para a maioria dos tratamentos (Figura 2). De acordo com Siqueira *et al.* (2008), a revegetação fornece carbono ao solo e sustenta a proliferação microbiana, refletindo em aumento rápido do carbono na biomassa, mas como a maior parte do C adicionado é consumida na oxidação, o acúmulo de C no solo é muito lento.

Para o solo os valores de COT e MOS foram maiores (Quadro 8) e apresentaram diferença significativa em relação aos tratamentos com substrato B1 na camada de cobertura (Quadro 9). Observou-se diferença significativa de BMS-C entre tratamentos que possuíam solo na camada selante (C<sub>7</sub>) em relação àqueles que possuíam substrato B1 quando a brita calcária foi utilizada na camada de quebra de capilaridade. A média de

BMS-C nos tratamentos em que solo foi utilizado na camada selante (T<sub>2</sub> e T<sub>3</sub>) foi de 12,83 mg kg<sup>-1</sup> (p<0,10) a mais do que os tratamentos com substrato B1 (T<sub>4</sub> e T<sub>5</sub>) nesta camada (Quadro 10). A presença de B1 na camada selante é um fator limitante para o desenvolvimento tanto da biomassa microbiana quanto da biomassa vegetal nestas parcelas.

Quadro 8. Teores de carbono orgânico total (COT), matéria orgânica (MO), respiração microbiana (RBS), carbono na biomassa microbiana (BMS-C), quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>) e quociente microbiano (qMIC) nas camadas de cobertura dos tratamentos estudados treze meses após o plantio

Tratamento	COT	MO	RBS	BMS-C	qCO <sub>2</sub>	qMIC
	—dag kg <sup>-1</sup> —		mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg mg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	%
T1 (-)	0,27	0,47	0,50	1,94	0,34	0,06
T2 (B1/So/Br)	0,19	0,33	0,26	3,87	0,03	0,37
T3 (So/So/Br)	1,79	3,09	0,27	26,14	0,01	0,15
T4 (B1/B1/Br)	0,25	0,43	0,53	1,45	0,21	0,12
T5 (So/B1/Br)	1,74	3,00	0,59	15,00	0,06	0,09
T6 (B1/-/Br)	0,18	0,31	0,25	1,45	0,08	0,06
T7 (So/-/Br)	1,48	2,55	0,36	16,46	0,03	0,11
T8 (B1/So/Lt)	0,40	0,70	0,40	2,42	0,05	0,09
T9 (So/So/Lt)	1,80	3,10	0,36	17,91	0,02	0,10
T10 (B1/B1/Lt)	0,24	0,42	0,45	1,45	0,04	0,33
T11 (So/B1/Lt)	1,70	2,93	0,32	23,23	0,02	0,14
T12 (B1/-/Lt)	0,33	0,56	0,56	1,94	0,01	0,09
T13 (So/-/Lt)	1,43	2,46	0,22	34,36	0,01	0,33

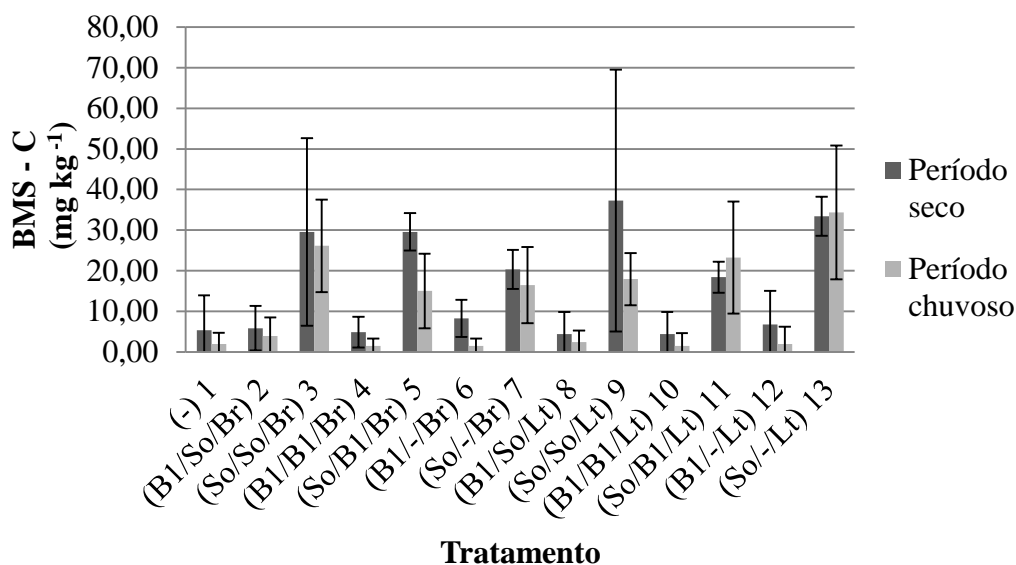


Figura 2. Carbono na biomassa microbiana nos períodos seco e chuvoso. As linhas verticais representam o erro padrão multiplicado pelo valor de t para um nível de significância de 5%.

Quadro 9. Análise de variância para carbono orgânico total (COT) e matéria orgânica (MO), respiração microbiana (RBS), carbono na biomassa microbiana (BMS-C), quociente metabólico ( $qCO_2$ ) e quociente microbiano ( $qMIC$ ) nas camadas de cobertura dos tratamentos estudados treze meses após o plantio

F. V.	GL	QM					
		COT	MO	RBS	BMS-C	$qCO_2$	$qMIC$
Blocos	2	-	-	-	-	-	-
C <sub>1</sub>	1	1,32**	3,90**	0,0414	288,31*	0,2298**	0,0277
C <sub>2</sub>	1	0,01	0,05	0,0005	71,83	0,0182	0,0087
C <sub>3</sub>	1	0,12	0,30	0,0491	28,39	0,0023	0,0318
C <sub>4</sub>	1	3,57**	11,37**	0,0001	743,48**	0,0011	0,0726
C <sub>5</sub>	1	3,34**	9,93**	0,0054	275,54*	0,0368	0,0013
C <sub>6</sub>	1	2,52**	7,50**	0,0171	337,65*	0,0048	0,0037
C <sub>7</sub>	1	0,0024	0,0001	0,2670*	137,84°	0,0374	0,0752
C <sub>8</sub>	1	0,0992	0,3007	0,0004	190,35°	0,0023	0,0087
C <sub>9</sub>	1	2,88**	8,62**	0,0024	359,75**	0,0013	0,0003
C <sub>10</sub>	1	3,18**	9,48**	0,0267	711,55**	0,0006	0,0561
C <sub>11</sub>	1	1,83**	5,45**	0,1768°	1577,56**	0,0001	0,0864
C <sub>12</sub>	1	0,05	0,15	0,0003	14,26	0,0002	0,0588
Resíduo	24	0,0468	0,1342	0,0567	45,42	0,0289	0,0459
CV (%)		23,73	23,40	60,97	59,35	240,03	137,68

Quadro 10. Contrastes médios e sua significância para valores de carbono orgânico total (COT) e matéria orgânica (MO), respiração microbiana (RBS), carbono na biomassa microbiana (BMS-C), quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>) e quociente microbiano (qMIC) nas camadas de cobertura dos treze tratamentos estudados após dez meses

Contraste	Contrastes Médios					
	COT	MO	RBS	BMS-C	qCO <sub>2</sub>	qMIC
	—dag kg <sup>-1</sup> —		mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg mg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	%
C <sub>1</sub>	0,69**	1,18**	-0,12	10,26*	-0,29**	0,10
C <sub>2</sub>	0,03	0,05	0,01	1,80	-0,03	0,02
C <sub>3</sub>	-0,03	-0,06	-0,02	-0,57	0,00	-0,02
C <sub>4</sub>	0,80**	1,38**	0,00	11,13**	-0,01	-0,11
C <sub>5</sub>	1,49**	2,57**	0,06	12,83*	-0,16	-0,03
C <sub>6</sub>	0,22**	0,37**	0,02	2,50*	-0,01	0,01
C <sub>7</sub>	0,01	0,01	0,60*	-12,83°	0,22	-0,31
C <sub>8</sub>	-0,32	-0,55	0,02	13,79°	-0,04	0,09
C <sub>9</sub>	1,39**	2,40**	-0,04	15,49**	-0,03	0,01
C <sub>10</sub>	0,73**	1,26**	-0,07	10,89**	-0,01	-0,10
C <sub>11</sub>	1,10**	1,90**	-0,34°	32,43**	0,00	0,24
C <sub>12</sub>	-0,26	-0,44	0,02	4,36	-0,02	0,28
CV (%)	23,73	23,40	60,97	59,35	240,03	137,68

°, \*, \*\*: Significativo a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.

C<sub>1</sub> (T<sub>1</sub> vs T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>+T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>2</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub> vs T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>3</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub> vs T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>); C<sub>4</sub> (T<sub>2</sub> vs T<sub>3</sub>); C<sub>5</sub> (T<sub>4</sub> vs T<sub>5</sub>); C<sub>6</sub> (T<sub>6</sub> vs T<sub>7</sub>); C<sub>7</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub> vs T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>); C<sub>8</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub> vs T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>9</sub> (T<sub>8</sub> vs T<sub>9</sub>); C<sub>10</sub> (T<sub>10</sub> vs T<sub>11</sub>); C<sub>11</sub> (T<sub>12</sub> vs T<sub>13</sub>) e C<sub>12</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub> vs T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>)

### 3.3.2. Teores foliares

#### 3.3.2.1. Primeira avaliação

Pela análise descritiva dos teores foliares de arsênio observou-se maiores teores no material vegetal das parcelas que continham substrato B1 na camada de cobertura (Quadro 11). A média dos teores de arsênio foi de 2,72 mg kg<sup>-1</sup> em tratamentos com solo e de 79,26 mg kg<sup>-1</sup> em tratamentos que receberam substrato B1. Esta diferença é reflexo dos maiores teores disponíveis de arsênio no substrato B1 em relação ao solo, dessa forma, maior quantidade foi absorvida pelas plantas. Observaram-se menores teores foliares de ferro e enxofre nos tratamentos que continham solo na camada de cobertura, o que pode ser explicado pelos menores teores disponíveis também encontrados no solo (Capítulo 1).

Apenas os teores foliares de arsênio no T<sub>8</sub> (B1/So/Lt) e T<sub>9</sub> (So/So/Lt) não diferiram significativamente entre si, o que pode ter ocorrido devido à grande variabilidade dos resultados obtidos entre as repetições.

A presença de camada selante em tratamentos com laterita na camada de quebra de capilaridade foi fator limitante para os teores de arsênio no material vegetal (C<sub>8</sub>) (Quadro 12). Em tratamentos que não possuíam camada selante, as plantas absorveram, em média, 83,8 mg kg<sup>-1</sup> (p < 0,01) a mais de arsênio do que aqueles que possuíam camada selante (Quadro 13). Tal diferença reforça a importância da camada selante tanto para evitar o contato da água com o substrato sulfetado quanto para diminuir a ascensão de arsênio oriundo do minério B2.

Quadro 11. Teores médios de cálcio (Ca), ferro (Fe), potássio (K), magnésio (Mg), fósforo (P), enxofre (S), manganês (Mn), zinco (Zn) e arsênio (As) na parte aérea das plantas coletadas nas parcelas dos diferentes tratamentos no quinto mês após o plantio

Tratamento	Teores foliares								
	Ca	Fe	K	Mg	P	S	Mn	Zn	As
	g kg <sup>-1</sup>					mg kg <sup>-1</sup>			
T1	7,70	2,25	16,26	5,77	2,12	4,14	74,08	43,91	47,86
T2	7,11	5,40	13,43	4,84	1,73	3,25	128,57	42,62	104,80
T3	7,93	1,28	15,24	3,78	1,38	2,27	110,97	24,73	2,00
T4	6,16	4,43	10,58	4,64	1,89	4,12	232,12	56,86	87,93
T5	5,79	1,21	16,25	3,61	1,14	2,03	109,77	22,68	2,40
T6	6,89	3,24	11,99	7,10	1,83	5,38	155,35	45,39	64,65
T7	8,29	2,51	14,52	4,14	1,40	2,81	174,28	28,66	3,05
T8	6,69	1,48	14,91	4,79	1,66	3,21	188,41	45,88	32,51
T9	7,66	1,17	13,40	3,39	1,21	1,93	161,38	22,52	1,65
T10	7,95	4,33	12,21	4,06	1,97	3,40	145,25	41,19	79,91
T11	7,54	2,34	17,17	3,74	1,31	2,31	168,75	30,92	2,35
T12	4,91	6,99	11,42	3,63	1,44	2,94	256,60	53,64	137,17
T13	9,33	3,93	14,79	4,60	1,44	2,53	255,86	29,17	4,84

Quadro 12. Análise de variância para teores médios de cálcio (Ca), ferro (Fe), potássio (K), magnésio (Mg), fósforo (P), enxofre (S), manganês (Mn), zinco (Zn) e arsênio (As) na parte aérea das plantas coletadas nas parcelas dos diferentes tratamentos no quinto mês após o plantio

F. V.	GL	QM								
		Ca	Fe	K	Mg	P	S	Mn	Zn	As
Blocos	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C <sub>1</sub>	1	0,72	2,45	16,46	5,51*	0,95**	3,50°	27615,44**	131,50	50,22
C <sub>2</sub>	1	0,89	1,19	0,90	3,82°	0,03	3,15°	17583,64*	1,42	10,19
C <sub>3</sub>	1	2,84	0,17	1,55	7,89*	0,03	5,58*	1513,86	0,36	952,34
C <sub>4</sub>	1	1,02	25,46**	4,88	1,66	0,19	1,47	464,46	480,26*	15850,73**
C <sub>5</sub>	1	0,20	15,58*	48,11°	1,59	0,85**	6,57**	22455,51**	1752,41**	10973,07**
C <sub>6</sub>	1	2,94	0,81	9,53	13,08**	0,27°	9,86**	537,71	419,84*	5693,07**
C <sub>7</sub>	1	7,13	0,81	2,54	0,10	0,0044	0,30	7854,59	111,63	203,53
C <sub>8</sub>	1	0,47	39,15**	6,92	0,06	0,04	0,0021	32607,33**	157,59	7021,88**
C <sub>9</sub>	1	1,41	0,14	3,40	2,97	0,31°	2,43°	1095,66	818,53**	1428,82
C <sub>10</sub>	1	0,25	5,90	37,00	0,15	0,67**	1,77	828,61	157,90	9024,11**
C <sub>11</sub>	1	29,35**	14,08*	17,00	1,38	0,0001	0,24	0,82	898,66**	26266,84**
C <sub>12</sub>	1	0,98	12,12°	0,84	0,11	0,12	0,24	960,69	10,27	1735,21
Resíduo	24	3,51	3,05	12,80	1,13	0,08	0,83	2794,32	81,77	613,63
CV (%)		25,93	56,01	25,53	23,79	17,87	29,30	31,79	24,08	56,39

Quadro 13. Contrastes médios e sua significância para teores médios de cálcio (Ca), ferro (Fe), potássio (K), magnésio (Mg), fósforo (P), enxofre (S), manganês (Mn), zinco (Zn) e arsênio (As) na parte aérea das plantas coletadas nas parcelas dos diferentes tratamentos no quinto mês após o plantio

Contraste	Contrastes médios								
	Ca	Fe	K	Mg	P	S	Mn	Zn	As
	g kg <sup>-1</sup>						mg kg <sup>-1</sup>		
C <sub>1</sub>	-0,51	0,94	-2,43	-1,41*	-0,59**	-1,12°	99,86**	-6,89	-4,26
C <sub>2</sub>	0,21	0,24	0,214	-0,43°	-0,04	-0,39°	29,47*	0,26	-0,71
C <sub>3</sub>	0,17	-0,04	-0,12	0,28*	0,02	0,24*	3,89	0,06	-3,09
C <sub>4</sub>	0,41	-2,06**	0,90	-0,53	-0,18	-0,49	-8,8	-8,95*	-51,4**
C <sub>5</sub>	-0,37	-3,22*	5,67°	-1,03	-0,75**	-2,09**	-122,35**	-34,18**	-85,53**
C <sub>6</sub>	0,23	-0,12	0,42	-0,49**	-0,07°	-0,43**	3,16	-2,79*	-10,27**
C <sub>7</sub>	-3,09	-1,04	-1,84	-0,37	-0,08	0,63	102,34	12,2	-16,47
C <sub>8</sub>	-0,69	6,26**	-2,64	0,24	-0,20	0,05	180,58**	12,55	83,80**
C <sub>9</sub>	0,97	-0,31	-1,51	-1,41	-0,45°	-1,28°	-27,03	-23,36**	-30,86
C <sub>10</sub>	-0,20	-0,99	2,48	-0,16	-0,33**	-0,54	11,75	-5,13	-38,78**
C <sub>11</sub>	4,42**	-3,06*	3,37	0,96	-0,00	-0,40	-0,74	-24,47**	-132,33**
C <sub>12</sub>	1,14	4,02°	1,06	-0,38	0,40	0,56	-35,79	3,70	48,10
CV (%)	25,93	56,01	25,53	23,79	17,87	29,30	31,79	24,08	56,39

°, \*, \*\*: Significativo a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.C1 (T1 vs T2+T3+T4+T5+T6+T7+T8+T9+T10+T11+T12+T13); C2 (T2+T3+T4+T5+T6+T7 vs T8+T9+T10+T11+T12+T13); C3 (T2+T3+T4+T5 vs T6+T7); C4 (T2 vs T3); C5 (T4 vs T5); C6 (T6 vs T7); C7 (T2+T3 vs T4+T5); C8 (T8+T9+T10+T11 vs T12+T13); C9 (T8 vs T9); C10 (T10 vs T11); C11 (T12 vs T13) e C12 (T8+T9 vs T10+T11).



### 3.3.2.2. Segunda avaliação

Na segunda avaliação os teores foliares de arsênio foram significativamente maiores para tratamentos que continham brita calcária na CQC em relação à laterita (Quadro 16). Os teores médios de arsênio nos tratamentos com brita na CQC foram de 6,12 mg kg<sup>-1</sup> (p < 0,05) maiores do que naqueles que possuíam laterita (Quadro 17).

Quadro 14. Teores médios de cálcio (Ca), ferro (Fe), potássio (K), magnésio (Mg), fósforo (P), enxofre (S), manganês (Mn), zinco (Zn) e arsênio (As) na parte aérea das plantas coletadas nas parcelas dos diferentes tratamentos no décimo terceiro mês após o plantio (n = 3)

Tratamento	Teores foliares								
	Ca	Fe	K	Mg	P	S	Mn	Zn	As
	g kg <sup>-1</sup>					mg kg <sup>-1</sup>			
T1 (-)	3,99	0,48	11,45	3,62	2,08	3,15	46,74	59,11	13,69
T2 (B1/So/Br)	3,91	0,92	10,96	3,56	1,52	2,07	115,26	32,87	20,45
T3 (So/So/Br)	9,00	1,66	12,05	3,15	1,42	2,13	106,58	18,84	9,05
T4 (B1/B1/Br)	4,95	1,69	11,21	3,78	1,92	3,36	207,98	49,85	35,20
T5 (So/B1/Br)	16,27	2,73	12,75	4,10	2,07	2,91	155,46	31,46	5,57
T6 (B1/-/Br)	4,58	2,32	11,10	4,37	2,15	3,41	94,47	42,33	54,79
T7 (So/-/Br)	13,99	3,04	11,75	3,61	1,50	2,96	159,40	29,62	7,06
T8 (B1/So/Lt)	2,81	1,00	10,44	3,65	1,36	2,13	207,89	39,77	20,15
T9 (So/So/Lt)	6,57	0,84	13,10	3,09	1,34	1,69	144,71	17,94	2,13
T10 (B1/B1/Lt)	3,59	0,97	9,82	3,15	2,08	2,62	144,66	55,32	20,87
T11 (So/B1/Lt)	4,86	1,11	9,54	2,42	1,26	1,46	174,53	20,87	2,78
T12 (B1/-/Lt)	2,59	1,28	8,66	3,14	1,26	2,40	357,01	49,63	26,61
T13 (So/-/Lt)	6,90	1,31	13,13	3,16	1,41	2,06	202,01	24,25	4,48

A presença da laterita pode ter favorecido a adsorção de arsênio devido à presença de óxidos de ferro em sua estrutura. Espera-se que o arsênio tenha sido adsorvido à camada de laterita, ao contrário do que ocorreu nos tratamentos que possuíam brita calcária, uma vez que este material pode ser responsável pela mobilização do arsênio, devido ao aumento do pH do meio. Dessa forma, menor quantidade de arsênio foi absorvida pelas plantas nos tratamentos que possuíam laterita na CQC. A diferença observada apenas após treze meses de plantio é decorrente do maior tempo necessário para que a laterita comece a fazer efeito sobre a retenção de arsênio, reduzindo seus teores ao longo das camadas. Além disso, a presença da laterita como barreira capilar pode ter sido mais eficiente do que a brita calcária no sentido de formar o gradiente hidráulico e

impedir a ascensão de arsênio ao longo das camadas. Portanto, a importância da laterita como CQC está relacionada tanto ao efeito químico quanto ao físico de mitigação da contaminação por arsênio.

### **3.3.3. Biomassa vegetal**

#### ***3.3.3.1. Primeira avaliação***

A produção de biomassa nos tratamentos que continham solo na CC foi maior do que nos tratamentos com B1. Apenas entre os tratamentos 12 e 13 (C<sub>11</sub>) essa diferença não foi significativa, o que pode ter sido ocasionado pelo crescimento da vegetação de forma não uniforme em algumas parcelas.

A presença de camada selante resultou em um efeito significativo apenas para tratamentos com brita calcária na camada de quebra de capilaridade (Quadro 18). Neste caso, a biomassa foi 0,30 t ha<sup>-1</sup> ( $p < 0,01$ ) maior nos tratamentos que possuíam camada selante (T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub> e T<sub>5</sub>) do que naqueles em que ela não estava presente (T<sub>6</sub> e T<sub>7</sub>) (C<sub>3</sub>) (Quadro 19). O efeito da camada selante nos tratamentos com laterita na CQC não foi significativo possivelmente pela variação na quantidade de biomassa produzida em cada bloco para estes tratamentos.

A produção de biomassa na primeira avaliação correlacionou-se negativamente com a condutividade elétrica do material de cobertura (Capítulo 1). Quanto maior a condutividade elétrica (CE) do material, menor foi a biomassa produzida na parcela (Quadro 15). Sendo assim, a maior produção de biomassa nas parcelas que continham solo na camada de cobertura está relacionada, também, à menor condutividade elétrica do solo em relação ao substrato B1.

Segundo Mello *et al.* (2006), valores elevados de CE encontrados no substrato B1 estão associados à presença de sulfetos neste material e conseqüentemente à drenagem ácida de mina. A oxidação dos sulfetos envolve reações de solubilização que aumentam a atividade iônica no meio, e conseqüentemente eleva os valores de condutividade elétrica. Os íons presentes em solução, no entanto, podem apresentar níveis considerados tóxicos às plantas dificultando, portanto, o seu crescimento.

Quadro 15. Matriz de correlação linear simples entre as variáveis Condutividade Elétrica e Biomassa para os treze tratamentos no quinto mês após o plantio

	CE	Biomassa (5° mês)
CE	1,00	
Biomassa (5° mês)	-0,39*	1,00

\*Significativo a 5%.

### 3.3.3.2. Segunda avaliação

De modo geral, na segunda avaliação, realizada no décimo terceiro mês após o plantio, observou-se maior produção de matéria seca em tratamentos que receberam solo na camada de cobertura em relação ao substrato B1 (Figura 3).

Em relação à primeira avaliação houve aumento da biomassa vegetal para a maioria dos tratamentos, exceto para T<sub>1</sub> (-) e T<sub>5</sub> (So/B1/Br) (Figura 3). No T<sub>5</sub>, a presença de substrato B1 na camada selante pode ter ocasionado a ascensão de As para a camada de cobertura por meio da evapotranspiração das plantas existentes. Sendo assim, maior quantidade de arsênio tornou-se disponível promovendo menor produção de matéria seca nesta parcela. O mesmo efeito não ocorreu no T<sub>4</sub> (B1/B1/Br), por exemplo, pois a presença de B1 na CC limitou o crescimento de plantas desde a primeira avaliação, resultando, dessa forma, em pequena produção de biomassa ao longo de todo o período de estudo.

Avaliando a produção de material vegetal em função do material presente na camada de quebra de capilaridade observou-se que tratamentos que apresentavam laterita na CQC produziram em média 0,98 t ha<sup>-1</sup> (p < 0,01) a mais de material vegetal do que os tratamentos que continham brita calcária nesta camada (Quadro 19). Novamente a presença da laterita pode ter favorecido tanto química quanto fisicamente por meio da adsorção de As ou pela limitação da ascensão capilar deste elemento, respectivamente. A influência da laterita na CQC também foi importante para a diminuição dos teores foliares de arsênio, reiterando a importância da utilização deste material como quebra de capilaridade em programas de revegetação de substratos sulfetados.

Dentro dos tratamentos que continham brita calcária na CQC, a presença de substrato B1 ou solo na camada selante apresentou efeito significativo na produção de biomassa vegetal (Quadro 18). Tratamentos que continham solo na camada selante produziram em média 5,16 t ha<sup>-1</sup> (p < 0,01) a mais do que tratamentos que continham

substrato B1 nesta camada (Quadro 19). O efeito mais expressivo da presença de solo na camada selante do que na de cobertura também foi observado por Assis (2006), o qual sugeriu que o uso desta camada seja indispensável para a revegetação deste tipo de ambiente.

Quadro16. Análise de variância para teores médios de cálcio (Ca), ferro (Fe), potássio (K), magnésio (Mg), fósforo (P), enxofre (S), manganês (Mn), zinco (Zn) e arsênio (As) na parte aérea das plantas coletadas nas parcelas dos diferentes tratamentos no décimo terceiro mês após o plantio

F. V.	GL	QM								
		Ca	Fe	K	Mg	P	S	Mn	Zn	As
Blocos	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C <sub>1</sub>	1	19,96	3,28*	0,16	0,10	43795,44*	0,63**	1,42	1690,85**	38,78
C <sub>2</sub>	1	161,12*	8,53**	6,58	3,92*	38348,08*	0,88**	5,02*	1,99	759,00*
C <sub>3</sub>	1	2,22	3,47*	0,41	0,48	1502,73	0,03	1,30	29,54	713,87*
C <sub>4</sub>	1	38,81	0,83	1,76	0,25	113,10	0,02	0,0067	295,26	194,94
C <sub>5</sub>	1	192,44*	1,61	3,54	0,16	4137,53	0,03	0,31	507,10°	1316,91**
C <sub>6</sub>	1	132,92*	0,79	0,63	0,86	6323,86	0,65**	0,30	242,44	3416,75**
C <sub>7</sub>	1	51,83	2,54*	0,68	1,02	15037,21	0,85**	3,21*	657,27°	95,26
C <sub>8</sub>	1	0,33	0,39	0,11	0,02	49784,02**	0,12	0,27	48,09	65,83
C <sub>9</sub>	1	21,24	0,04	10,59	0,47	5988,83	0,0006	0,30	714,17*	487,08°
C <sub>10</sub>	1	2,44	0,03	0,13	0,80	1338,03	1,03**	1,97	1780,20**	491,05°
C <sub>11</sub>	1	27,91	0,0011	30,11*	0,0004	36034,40*	0,04	0,17	966,22*	734,61*
C <sub>12</sub>	1	0,64	0,04	13,13	1,04	837,00	0,31*	0,05	256,41	1,40
Resíduo	24	28,62	0,58	4,64	0,54	0,05	0,71	6352,34	165,93	164,08
CV (%)		82,80	51,09	19,19	21,39	13,51	33,85	48,95	35,49	74,73

Quadro 17. Contrastes médios e sua significância para teores médios de cálcio (Ca), ferro (Fe), potássio (K), magnésio (Mg), fósforo (P), enxofre (S), manganês (Mn), zinco (Zn) e arsênio (As) na parte aérea das plantas coletadas nas parcelas dos diferentes tratamentos no décimo terceiro mês após o plantio

Contraste	Contrastes médios								
	Ca	Fe	K	Mg	P	S	Mn	Zn	As
	g kg <sup>-1</sup>						mg kg <sup>-1</sup>		
C <sub>1</sub>	2,68	1,09*	-0,24	-0,19	-0,48**	-0,71	125,76*	24,71**	3,74
C <sub>2</sub>	-2,82*	-0,65**	-0,57	-0,44*	-0,21**	-0,5*	43,52*	0,31	-6,12*
C <sub>3</sub>	0,15	0,19*	-0,06	0,07	0,02	0,11	-3,88	0,54	2,67*
C <sub>4</sub>	2,54	0,37	0,54	-0,2	-0,05	0,03	-4,34	-7,01	-5,7
C <sub>5</sub>	11,33*	1,03	1,53	0,33	0,15	-0,46	-52,52	-18,39°	-29,64**
C <sub>6</sub>	1,57*	0,12	0,11	-0,13	-0,11**	-0,08	10,82	-2,12	-7,95**
C <sub>7</sub>	8,31	1,84*	0,95	1,17	1,06**	2,07*	141,6	29,6°	11,27
C <sub>8</sub>	0,57	0,62	0,34	0,15	-0,34	0,51	223,13**	6,93	8,11
C <sub>9</sub>	3,76	-0,15	2,66	-0,56	-0,02	-0,45	-63,18	-21,83*	-18,02°
C <sub>10</sub>	0,64	0,07	-0,14	-0,36	-0,41**	-0,58	14,93	-17,23**	-9,05°
C <sub>11</sub>	4,32	0,03	4,48*	0,01	0,16	-0,34	-154,99*	-25,38*	-22,13*
C <sub>12</sub>	-0,93	0,24	-4,18	-1,18	0,65*	0,26	-33,4	18,49	1,37
CV (%)	82,80	82,80	19,19	21,39	13,51	33,85	48,95	35,49	74,73

°, \*, \*\*: Significativo a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.

C<sub>1</sub> (T<sub>1</sub> vs T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>+T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>2</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub> vs T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>3</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub> vs T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>); C<sub>4</sub> (T<sub>2</sub> vs T<sub>3</sub>); C<sub>5</sub> (T<sub>4</sub> vs T<sub>5</sub>); C<sub>6</sub> (T<sub>6</sub> vs T<sub>7</sub>); C<sub>7</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub> vs T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>); C<sub>8</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub> vs T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>9</sub> (T<sub>8</sub> vs T<sub>9</sub>); C<sub>10</sub> (T<sub>10</sub> vs T<sub>11</sub>); C<sub>11</sub> (T<sub>12</sub> vs T<sub>13</sub>) e C<sub>12</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub> vs T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>)

Quadro 18. Análise de variância para valores médios de matéria seca produzida por tratamento no quinto e no décimo terceiro mês

F. V.	GL	QM	
		5° mês	13° mês
Blocos	2		
C <sub>1</sub>	1	1,42	9,02*
C <sub>2</sub>	1	0,07	19,49**
C <sub>3</sub>	1	8,82**	3,37
C <sub>4</sub>	1	12,79**	4,75°
C <sub>5</sub>	1	31,56**	1,03
C <sub>6</sub>	1	6,93**	3,41
C <sub>7</sub>	1	0,56	19,92**
C <sub>8</sub>	1	2,51	3,30
C <sub>9</sub>	1	14,04**	39,48**
C <sub>10</sub>	1	9,40**	16,24**
C <sub>11</sub>	1	1,03	1,53
C <sub>12</sub>	1	0,01	1,78
Resíduo	24	0,86	1,38
CV (%)		30,31	32,32

Quadro 19. Contrastes médios e sua significância para valores médios de matéria seca produzida por tratamento no quinto e no décimo terceiro mês

Contraste	Contrastes médios	
	5° mês	13° mês
		t ha <sup>-1</sup>
C <sub>1</sub>	0,72	1,81*
C <sub>2</sub>	-0,06	0,98**
C <sub>3</sub>	-0,30**	-0,18
C <sub>4</sub>	1,46**	0,89°
C <sub>5</sub>	4,59**	-0,83
C <sub>6</sub>	0,36**	0,25
C <sub>7</sub>	0,87	-5,16**
C <sub>8</sub>	-1,59	-1,82
C <sub>9</sub>	3,06**	5,13**
C <sub>10</sub>	1,25**	1,64**
C <sub>11</sub>	0,83	-1,01
C <sub>12</sub>	-0,11	-1,54
CV (%)	30,31	32,32

°, \*, \*\*: Significativo a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.

C<sub>1</sub> (T<sub>1</sub> vs T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>+T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>2</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>+T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub> vs T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>+T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>3</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub>+T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub> vs T<sub>6</sub>+T<sub>7</sub>); C<sub>4</sub> (T<sub>2</sub> vs T<sub>3</sub>); C<sub>5</sub> (T<sub>4</sub> vs T<sub>5</sub>); C<sub>6</sub> (T<sub>6</sub> vs T<sub>7</sub>); C<sub>7</sub> (T<sub>2</sub>+T<sub>3</sub> vs T<sub>4</sub>+T<sub>5</sub>); C<sub>8</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub>+T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub> vs T<sub>12</sub>+T<sub>13</sub>); C<sub>9</sub> (T<sub>8</sub> vs T<sub>9</sub>); C<sub>10</sub> (T<sub>10</sub> vs T<sub>11</sub>); C<sub>11</sub> (T<sub>12</sub> vs T<sub>13</sub>) e C<sub>12</sub> (T<sub>8</sub>+T<sub>9</sub> vs T<sub>10</sub>+T<sub>11</sub>)

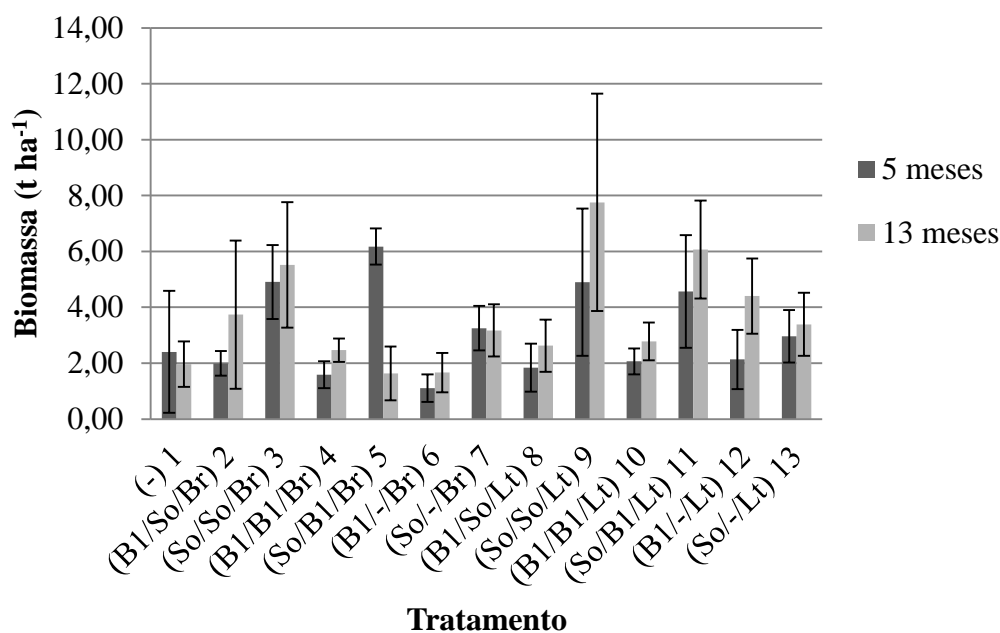


Figura 3. Biomassa produzida por tratamento no quinto e décimo terceiro mês. As linhas verticais representam o erro padrão multiplicado pelo valor de t para um nível de significância de 5%.

### 3.3.4. Avaliação das espécies utilizadas

De modo geral, na primeira avaliação (maio de 2012), realizada cinco meses após o plantio, a maioria das espécies plantadas toleraram as condições de substrato e clima. Dentre as espécies utilizadas, a crotalária (*Crotalaria spectabilis* Roth.) se mostrou tolerante aos teores mais altos de arsênio no substrato B1 e o azevém (*Lolium multiflorum* Lam) não se estabeleceu neste material.

Uma vez que o solo foi retirado da área de empréstimo próxima ao experimento, observou-se existência de espécies invasoras neste material, dentre elas a Braquiária (*Brachiaria decumbens*), que é uma espécie exótica e sua utilização não é recomendada pelo órgão estadual de meio ambiente (FEAM) em programas de revegetação de áreas degradadas.

Na segunda avaliação, realizada dez meses após o plantio e durante a época de seca, a maioria das espécies encontrava-se seca, devido às condições de baixa umidade do solo e substrato e também, devido à possível ascensão de sais nas camadas com substrato B1. Neste período, apenas a crotalária (*Crotalaria spectabilis* Roth.) não se apresentava completamente seca em alguns tratamentos, reiterando sua resistência a



condições adversas de umidade e teores de arsênio. Além disso, esta é uma espécie naturalmente encontrada na região, representando grande potencial para revegetação de substratos sulfetados (NERI *et al.*, 2004). Devido à seca das plantas, não foi realizada coleta de biomassa nesta avaliação.

Na terceira avaliação, aos treze meses após o plantio, realizada no início do período chuvoso, observou-se maior crescimento de braquiária nas parcelas que continham solo na camada de cobertura. Nas parcelas com substrato B1 a espécie que mais se destacou foi o capim-gordura (*Melinis minutiflora* P. Beauv), seguido da crotalária (*Crotalaria spectabilis* Roth.). O capim-gordura possui grande importância para a revegetação deste substrato já que produz quantidade considerável de biomassa, fundamental para o processo de incorporação de carbono ao substrato (DIAS *et al.*, 2008).

Em todas as avaliações observou-se, nas parcelas com solo na camada de cobertura, maior diversidade de espécies. Dentre as espécies plantadas, crotalária (*Crotalaria spectabilis* Roth.), mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum* Piper & Tracy) e estilosantes (*Stylosanthes spp.* – *Stylosanthes capitata* Vogel e *S. macrocephala* M. B. Ferr. et S. Costa), foram as que se sobressaíram, além de outras espécies invasoras.

Dentre as espécies plantadas no substrato B1, azevém (*Lolium multiflorum* Lam) e estilosantes (*Stylosanthes spp.* – *Stylosanthes capitata* Vogel e *S. macrocephala* M. B. Ferr. et S. Costa) não obtiveram crescimento satisfatório neste material. Sendo assim, sua utilização para revegetação de substrato sulfetado possivelmente não é adequada nas condições estudadas.

### **3.4. CONCLUSÃO**

A presença de solo na camada de cobertura possibilitou maior produção de biomassa devido às melhores condições químicas, físicas e biológicas deste material em relação aos demais materiais testados.

A presença de laterita na camada de quebra de capilaridade também resultou em maior quantidade de biomassa e menor absorção de arsênio pelas plantas.

A espécie que melhor se sobressaiu no substrato B1 foi o capim gordura (*Melinis minutiflora* P. Beauv), a qual produziu grande quantidade de biomassa. A crotalária também apresentou resistência às condições deste substrato.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após diversos trabalhos realizados com o intuito de revegetar áreas que contenham sulfetos percebe-se que o uso de camadas de recobrimento deste material é imprescindível para a sustentabilidade da vegetação.

Diante da importância da camada de quebra de capilaridade para o processo de revegetação destas áreas, foi observado que a utilização de laterita em relação à brita calcária contribui para o aumento da biomassa produzida favorecendo, portanto, o processo de recuperação destas áreas. Contudo, avaliações futuras devem ser realizadas de modo a avaliar o comportamento desta camada ao longo do tempo, no que diz respeito à produção de biomassa e melhoria das condições do substrato.

O uso de solo na composição das camadas selante e de cobertura propicia melhores condições para o estabelecimento de plantas do que quando é usado o substrato B1. No entanto, a utilização desse substrato na camada de cobertura reduziria a demanda por solo diminuindo os custos e a degradação nas áreas de empréstimo. Porém, atenção especial deve ser dada à presença de As neste material. Dessa forma, espécies tolerantes ou acumuladoras de As devem estar presentes no programa de revegetação.

Dentre os diversos tratamentos estudados, aquele que possui laterita na CQC, solo na CS e solo na CC são os mais indicados para cobertura deste tipo de material para fins de revegetação. No entanto, diante da importância da utilização do substrato B1 visando redução de custos e menor degradação de áreas de empréstimo, um modelo de camadas contendo laterita na CQC, solo na CS e substrato B1 na CC pode ser adotado para esta finalidade.

## LITERATURA CITADA

- ALLOWAY, B.J. Heavy metals in soils. London: Blackie A e P, 1995. 368p.
- ALVAREZ V., V.H. & ALVAREZ, G.A.M. Comparação de médias ou teste de hipóteses? *Contrastes! Bol.Inf. SBCS*, 31:24-34, 2006.
- ALVAREZ V., V.H.; DIAS, L.E.; RIBEIRO JR, E.S.; SOUZA, R.B.; FONSECA, C.A. Métodos de análises de enxofre em solos e plantas. Viçosa: UFV, 131p., 2001.
- AN, S.; HUANG, Y.; ZHENG, F. Evaluation of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soils on the Loess Plateau, Northwest China. *Applied Soil Ecology*, mar. 2009. v. 41, n. 3, p. 286–292. . Acesso em: 8 mar. 2013.
- ANDERSON, J. P. E. Soil respiration. In: Page, A. L., Miller, R. H., Keeney, D. R. (eds). *Methods of soil analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. 2<sup>nd</sup> ed. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 831-871. 1982.
- ANDERSON, J.P.E. & DOMSCH, K.H. The metabolic quotient ( $qCO_2$ ) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biol. Biochem.*, 25: 393-395, 1993.
- ANDERSON, T.H. & DOMSCH, K.H. Determination of ecophysiological maintenance carbon requirements of soil microorganism in a dominant state. *Biol. Fertil. Soils*, 1:81-89, 1985.
- ASSIS, I. R. de. Mitigação da lixiviação de arsênio, ferro e enxofre e revegetação de substratos minerados em área de ocorrência de Drenagem Ácida. Viçosa: UFV, 2006.
- ASSIS, I. R.; DIAS, L. E. ; ABRAHAO, W. A. P. ; RIBEIRO JR., E. S. ; MELLO, J. W. V. Cover layers to the growth of trees and shrubs over a sulfide spoil from gold mining. *Revista Árvore (Impresso)*, v. 35, p. 941-947, 2011.
- ASSIS, I. R.; DIAS, L. E.; RIBEIRO JR., E. S.; ABRAHAO, W. A. P.; MELLO, J. W. V.; VELOSO, R. W. Induction of geochemical barrier for As, Fe And S immobilization in a sulfide substrate. *Rev. Bras. de Ciênc. do Solo (Impresso)*, v. 36, p. 671-679, 2012.

- BLOWES, D.W., JAMBOR, J.L., HANTON-FONG, C.J., LORTIE, L., AND GOULD, W.D. Geochemical, mineralogical and microbiological characterization of sulphide-bearing carbonate-rich gold-mine tailings impoundment, Joutel, Québec. *Applied Geochemistry*, v. 13(6), 1998. p. 687-705.
- BROOKES, P.C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. *Biology and Fertility of Soils* v.19, p. 269-279. 1995.
- CARNEIRO, M.A.C.; SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; SOARES, A.L.L., Carbono orgânico, nitrogênio total, biomassa e atividade microbiana do solo em duas cronossequencias de reabilitação após a mineração de bauxita. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 32:621-632, 2008.
- CORDEIRO, L. Fixação de nitrogênio em leguminosas ocorrentes no Cerrado. In: KLEIN, A. L. (Org.). *Eugen warming e o cerrado brasileiro: um século depois*. São Paulo: UNESP, 2002. p 131-145.
- COSTA, L. A. M. Novos Conceitos sobre o Grupo Bambuí e sua divisão em Tectonogrupos. In: *Boletim de Geologia*. Rio de Janeiro. (5): p.3-34. 1970.
- DANIEL, A.M. Avaliação preliminar do potencial de geração de águas ácidas por atividades minerárias no Estado de Minas Gerais. Viçosa, MG: UFV, 110p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2000.
- DIAS, L. E.; ASSIS, I. R.; DANIELS, W. L. Revegetation of acid forming mine spoil in Paracatu, Minas Gerais State, Brazil. In: NATIONAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF MINING AND RECLAMATION, 2008, Richmond: New opportunities to apply our science. American Society of Mining and Reclamation, 2008.
- DIAS, L. E.; GRIFFITH, J. J. Conceituação e caracterização de áreas degradadas. In: DIAS, L. E., MELLO, J. W. V. *Recuperação de áreas degradadas*. Viçosa, MG: Folha de Viçosa, 1998. p. 1-7.
- DNPM, Brasil. *Sumário Mineral 2012*. Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, DF. v. 32. 110 p.

- DORAN, J. W. & PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DONRAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (eds.) Defining soil quality for a sustainable environment. Madison: SSSA, 1994. p.03-21.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro. p. 212. 1997.
- EPA. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices - 3052. Washington, USA: Revision, December, CD-rom, 1996
- EVANGELOU, V. P. Pyrite oxidation and its control. New York: CRC, 1995. 293p.
- FENG, Q.; ZHANG, Z.; CHEN, Y.; LIU, L.; ZHANG, Z.; CHEN, C. Adsorption and Desorption Characteristics of Arsenic on Soils: Kinetics, Equilibrium, and Effect of Fe(OH)<sub>3</sub> Colloid, H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> Colloid and Phosphate, Procedia Environmental Sciences, Volume 18, 2013, p. 26-36.
- GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; SANTOS, G.A. Carbon, nitrogen and activity of microbial biomass in soil under eucalypt plantations. Revista Brasileira de Ciência do Solo, dez. 2005. v. 29, n. 6, p. 893–901. . Acesso em: 1 mar. 2013.
- GAMA-RODRIGUES, E.F. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo – Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, Genesis, 1999. 491p
- GAMA-RODRIGUES, E.F. da; GAMA-RODRIGUES, A.C. da. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L.S. da; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A. de O. (Ed.). Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. 2.ed. rev. e atual. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.159-170
- GODOI, E. L.; BORGES, J. D.; LEANDRO, W. M. Índices de cobertura vegetal e fitomassa de *Stylosanthes guianensis* cv. Mineirão em área degradada fertilizada com adubo e biossólido. Pesquisa Agropecuária Tropical, v.38, n. 1, p.21-26, 2008.

- GUIMARÃES, L. A. O. P. Atributos físicos de um substrato formado pela disposição de rejeito de beneficiamento de bauxita após uma década de recuperação ambiental. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa: julho de 2010. 65p.
- HEINEMEYER, O., INSAM, H., KAISER, E. A. and WALENZIK. Soil microbial biomass and respiration measurement: An automated technique based on infrared gas analysis. *Plant and Soil* v. 116, p. 191-195. 1989.
- HENDERSON, R. D. Paracatu Mine Technical Report. Kinross. Paracatu, 2006. 179 p.
- HOEFT, R.G.; WALSH, L.M. & KEENEY, D.R. Evaluation of various extractants for available sulfur. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37:401-404, 1973.
- HUMINICKI, D. M. C. & J. D. Rimstidt Iron oxyhydroxide coating of pyrite for acid mine drainage control. *Applied Geochemistry*, 24, 1626-1634. 2009.
- IBRAM. Informações e análises da economia mineral brasileira. Instituto Brasileiro de Mineração. 6ª ed. 2011. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/>. Acesso em 04 jan. 2013.
- ISLAM, K. R. & WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. *Biology and Fertility of Soils* v. 27, p. 408-416. 1998.
- LIAO, M.; XIE, X. M. Effect of heavy metals on substrate utilization pattern, biomass, and activity of microbial communities in a reclaimed mining wasteland of red soil area. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, fev. 2007. v. 66, n. 2, p. 217–223. . Acesso em: 8 mar. 2013.
- LINDSAY, M. B. J., C. J. Ptacek, D. W. Blowes & W. D. Gould. Zero-valent iron and organic carbon mixtures for remediation of acid mine drainage: Batch experiments. *Applied Geochemistry*, 23, 2214-2225. 2008.
- LUO Y, ZHOU X (2006) *Soil Respiration and the Environment*. Academic Press/ Elsevier, San Diego, CA, USA, p. 328.
- LUZ, W.V. Indução experimental de barreira geoquímica em substrato sulfetado para a mitigação de drenagem ácida. Viçosa, MG: UFV. 79p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2008.

- LYNCH, L. S. Indicadores de recuperação de áreas degradadas pela exploração de bauxita em Porto Trombetas – PA. Viçosa, MG, 2004. 60p. Dissertação de mestrado em Solos e Nutrição de Plantas: Universidade Federal de Viçosa, 2004.
- MEHLICH, A. Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH<sub>4</sub> by North Carolina Soil Testing Laboratoris. Raleigh, University of North Carolina, 1953. não publicado.
- MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractanta modification of Mehlich 2 extractant. Comm. Soil Science Plant Analysis, 15(2):1409-16, 1984.
- MELLO, J. W. V., ABRAHÃO W. A. P. Geoquímica da drenagem ácida. In: DIAS, L. E., MELLO, J. W. V. Recuperação de áreas degradadas. Viçosa, MG: Folha de Viçosa, 1998. p. 45-57.
- MELLO, J. W. V.; DIAS, L. E. & CORRÊA, M. L. T. Drenagem ácida: Avaliação do potencial de ocorrência, mitigação e revegetação de substratos sulfetados. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S. & ALVAREZV., V. H. eds., Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. V.3. p.401-430.
- MELLO, J. W. V.; DIAS, L. E. D.; DANIEL, A. M.; ABRAHÃO, W. A. P.; DESCHAMPS, E.; SCHAEFER, C. E. G. R. Preliminary evaluation of acid mine drainage in Minas Gerais state, Brazil. Rev. Bras. de Ciênc. do Solo (Impresso), v. 30, p. 365-375, 2006.
- MELO, R. F. (2006). Potencial de espécies vegetais para fitorremediação de um solo contaminado por arsênio. Tese de Doutorado apresentada à UFV, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG: setembro de 2006. 119p.
- MENDONÇA, E.S. & MATOS, E.S. Matéria orgânica do solo; métodos de análises. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2005. 107p.
- MONTEIRO, J. L. F. Decomposição térmica da pirita em leito fluidizado. Rio de Janeiro: UFRJ, 1980. 144p. Tese (Doutorado em Solos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1980.

- MOREIRA, P. R. Manejo do solo e recomposição da vegetação com vistas a recuperação de áreas degradadas pela extração de bauxita, Poços de Caldas, MG. Rio Claro: UNESP, 2004. 139p. Tese Doutorado
- NERI, A. V.; SOARES, M. P. MEIRA NETO, J. A. A.; DIAS, L. E. (2004) Levantamento florístico e análise de estrutura de remanescentes de Cerrado em área de exploração de ouro contendo sulfetos metálicos em Paracatu, MG. In: Congresso Nacional de Botânica e 26° Encontro Regional de Botânicos de MG, BA e ES, 2004, Viçosa. Congresso Nacional de Botânica. CD-Rom.
- NIEMEYER, J. C. et al. Microbial indicators of soil health as tools for ecological risk assessment of a metal contaminated site in Brazil. *Applied Soil Ecology*, ago. 2012. v. 59, p. 96–105. . Acesso em: 8 mar. 2013.
- NUNES, J. S. et al. Impact of Land Degradation on Soil Microbial Biomass and Activity in Northeast Brazil. *Pedosphere*, fev. 2012. v. 22, n. 1, p. 88–95. . Acesso em: 8 mar. 2013.
- NUNES, L.A.P.L. Qualidade de um solo cultivado com café e sob mata secundária no município de Viçosa-MG. Viçosa, MG: UFV, 2003. 102p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2003.
- RIBEIRO JR, E.S. Adsorção e dessorção de arsênio em solos e substratos de mineração de ouro e práticas de mitigação de drenagem ácida em colunas de lixiviação. Viçosa, MG: UFV, 117p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). *R. Bras. Ci. Solo*, 29:297-300, 2005.
- SANTANA FILHO, S. Distribuição de arsênio e oxidação de materiais sulfetados de áreas de mineração de ouro no estado de Minas Gerais. Tese de doutorado apresentada à UFV, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa: julho de 2005. 191 p.
- SANTOS, R. D., LEMOS, R. D., SANTOS, H. D., Ker, J. C., & ANJOS, L. D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5ª ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.



- SEDE. Perfil Mínero Metalúrgico 2011. Secretaria de desenvolvimento econômico de Minas Gerais, 2012. 73 p.
- SHU, W.S.; YE, Z.H.; LAN, C.Y.; ZHANG, Z.Q. & WONG, M.H. Acidification of lead/zinc mine tailings and its effect on heavy metal mobility. *Environ. Inter.*, 26:389-394, 2001.
- SILVA, L. C. R. & CORRÊA, R. S. Evolução da qualidade do substrato de uma área minerada no cerrado revegetada com *Stylosanthes* spp. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* [online]. 2010, vol.14, n.8, pp. 835-841. ISSN 1807-1929.
- SILVA, R. R.; SILVA, M.L.N.; CARDOSO, E.L.; MOREIRA, F.M.S.; CURI, N.; ALOVISI, A.M.T. Soil biomass and microbial activity under different management systems in the physiographic region Campos das Vertentes - Minas gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, out. 2010. v. 34, n. 5, p. 1584–1592. . Acesso em: 1 mar. 2013.
- SIQUEIRA, J. O; SOARES, C.R.F.S; SILVA, C.A. Matéria Orgânica em solos de áreas degradadas. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (eds). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 495-524.
- SOUZA, A. Relatório Final de Pesquisa do Morro do ouro. Paracatu - MG. Enjex Mineração Ltda. 1978.
- SPARLING, G. P.; WEST, A. W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: calibration in situ using microbial respiration and <sup>14</sup>C labelled cells. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 20, n. 3, p. 337–343, 1988.
- STOTZKY, G. Microbial respiration. In: BLACK, C. A (ed). *Methods of Soil Analysis*, Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.1151-1572.
- SUNDBLAD, B. Ten years experience of a multilayer cover system for uranium mill tailings in Ranstad Sweden. In: CONFERENCE MINING AND THE ENVIRONMENT, 3., 2003, Sudbury. *Proceedings...* Sudbury: 2003.
- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. *Análise de solo, plantas e outros materiais*. Porto Alegre : UFRGS, 1995. 174 p.

- TORDOFF, G. .; BAKER, A. J. .; WILLIS, A. . Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere*, jul. 2000. v. 41, n. 1–2, p. 219–228. . Acesso em: 12 jan. 2013.
- VANCE, E.D.; BROOKES, P.C. & JENKINSON, D.S. An extraction method for measuring soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.*, 19:703-707, 1987.
- VARENNE, A.; QU, G.; CORDOVIL, C.; GONÇALVES, P. Soil quality indicators response to application of hydrophilic polymers to a soil from a sulfide mine. *Journal of Hazardous Materials*, v. 192, n. 3, p. 1836–1841, 15 set. 2011.
- VEZZANI, F. M.; CONCEIÇÃO, P. C.; MELLO, N. A.; DIECKOW, J. Matéria orgânica e qualidade do solo. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (eds). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. P.483-493.
- WEI, Y. et al. Relationship Between Vegetation Restoration and Soil Microbial Characteristics in Degraded Karst Regions: A Case Study. *Pedosphere*, fev. 2011. v. 21, n. 1, p. 132–138. . Acesso em: 8 mar. 2013.
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:1467-1476, 1988.
- ZHANG, M.-K.; FANG, L. Effect of tillage, fertilizer and green manure cropping on soil quality at an abandoned brick making site. *Soil and Tillage Research*, mar. 2007. v. 93, n. 1, p. 87–93. . Acesso em: 11 mar. 2013.

## ANEXO

Fotografias do experimento instalado na empresa Kinross Brasil Mineração em Paracatu – MG.



**Fotografia 1.** Montagem da camada de substrato B2 (50 cm) na base do experimento.



**Fotografia 2.** Instalação das camadas de quebra de capilaridade (10 cm) formadas por brita calcária e laterita.



**Fotografia 3.** Instalação das camadas selantes (20 cm) formadas por substrato B1 ou solo compactados.



**Fotografia 4.** Instalação das camadas de cobertura (20 cm) formadas por substrato B1 ou solo sem compactação.



**Fotografias 5 e 6.** Cobertura vegetal acima do solo e do substrato B1 cinco meses após o plantio.





**Fotografias 7 e 8.** Cobertura vegetal acima do substrato B1 no período seco (10 meses após o plantio) e no período chuvoso (treze meses após o plantio).



**Fotografias 9 e 10.** Cobertura vegetal acima do solo no período seco (10 meses após o plantio) e no período chuvoso (treze meses após o plantio).



**Fotografias 11 e 12.** Produção de biomassa entre tratamentos com solo e substrato B1 na camada selante.