

ESPÉCIES ARBÓREAS POTENCIAIS PARA A REVEGETAÇÃO DE REJEITO SALINO CONTAMINADO COM ARSÊNIO¹

POTENTIAL TREE SPECIES FOR REVEGETATION OF SALINE TAILING CONTAMINATED WITH ARSENIC

Lorena Abdalla de Oliveira Prata Guimarães² Igor Rodrigues de Assis³ Luiz Eduardo Dias⁴
Amanda Longhi Cordeiro⁵ Aline Soares Freire⁶

RESUMO

O beneficiamento dos minérios de ouro explorados em Paracatu, MG, gera rejeitos com características químicas e físicas limitantes ao crescimento de plantas, principalmente pelo elevado teor de arsênio (As) e salinidade. Para a revegetação desse material, é necessário identificar espécies capazes de se desenvolver sob essas condições. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de quatro espécies arbóreas para a revegetação de rejeito salino contaminado com As. O substrato de plantio consistiu em rejeitos provenientes do beneficiamento do minério B1. As espécies *Tibouchina granulosa* (quaresmeira), *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke (paricá), *Euterpe edulis* Mart. (juçara) e *Cassia grandis* (cássia-rósea) foram plantadas por meio de mudas e, após quatro meses de cultivo, foram avaliados atributos dos substratos e das plantas. Diversas plantas apresentaram sintomas causados, possivelmente, pela toxicidade de As. Esses sintomas foram mais evidentes e intensos nas plantas de quaresmeira e juçara. No entanto, somente as plantas de quaresmeira morreram, provavelmente devido à elevada taxa de translocação de As (51%) e à inexistência de mecanismos de tolerância da espécie. O potencial de uso das espécies para a revegetação do rejeito segue a ordem paricá > cássia-rósea. Paricá é a que apresenta o maior potencial para a implantação inicial de vegetação, demonstrando maior capacidade de adaptação às características do rejeito. As espécies juçara e quaresmeira não são recomendadas para a revegetação do rejeito. Possivelmente o arsênio e/ou a salinidade comprometem o desenvolvimento das plantas, sendo letais para a quaresmeira.

Palavras-chave: substratos sulfetados; recuperação ambiental; espécies nativas.

ABSTRACT

The processing of gold ores exploited in Paracatu, MG, generates tailings with chemical and physical characteristics adverse to plants growth, mainly by high concentration of arsenic (As) and salinity. The revegetation of this material requires identify species capable of grow under these conditions. This study aimed to evaluate the potential of four tree species for revegetation of saline tailing contaminated with As. The planting substrate consisted of tailings from processing of ore called B1. The species *Tibouchina granulosa* (quaresmeira), *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke (paricá), *Euterpe edulis* Mart. (juçara)

1 Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, Brasil.

2 Engenheira Agrônoma, Dr^a., Pesquisadora do Incaper, Rodovia João Domingo Zago, km 2,5, Pacotuba, CEP 29323-000, Cachoeiro de Itapemirim (ES), Brasil. lorena.prata@hotmail.com

3 Engenheiro Agrícola e Ambiental, Dr., Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, Av. P.H. Rolfs, s/n, Campus Universitário, CEP 36570-000, Viçosa (MG), Brasil. igor.assis@ufv.br

4 Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, Av. P.H. Rolfs, s/n, Campus Universitário, CEP 36570-000, Viçosa (MG), Brasil. ledias@ufv.br

5 Engenheira Florestal, Mestranda em Ciências de Florestas Tropicais, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Av. André Araújo, 2936 – Petrópolis, CEP 69060-001, Manaus (AM), Brasil. amanda_longhi@hotmail.com

6 Química Industrial, MSc., Professora do Departamento de Química Analítica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Avenida Athos da Silveira Ramos, 149, Centro de Tecnologia, Ilha do Fundão, CEP 21941-909, Rio de Janeiro (RJ), Brasil. asfreire@iq.ufrj.br

and *Cassia grandis* (cássia-rósea) were planted by seedlings and, after four months, the attributes of the substrate and plants were evaluated. Several plants showed symptoms possibly caused by As-toxicity. These symptoms were more evident and intense in quaresmeira and juçara. However, only the plants of quaresmeira died, probably due to the high rate of As-translocation (51 %) and absence of tolerance mechanisms of the specie. The potential use of species for revegetation of tailings follows the order paricá > cássia-rósea. Paricá is the one with the greatest potential for initial deployment of vegetation, demonstrating the greater ability to adapt to tailing characteristics. The juçara and quaresmeira species are not recommended for the revegetation of tailings. Probably arsenic and/or salinity affect the development of plants, being lethal to quaresmeira.

Keywords: sulfide substrates; land reclamation; native species.

INTRODUÇÃO

A exploração de minérios associados a minerais sulfetados, como pirita (FeS_2) e arsenopirita (FeAsS), pode expor à atmosfera sulfetos que, ao entrarem em contato com água e oxigênio, sofrem oxidação (BLOWES et al., 1998). Os produtos da oxidação dos sulfetos, além de serem altamente solúveis, apresentam reação fortemente ácida, acidificando as águas de drenagem (MELLO; ABRAHÃO, 1998). Em razão dos baixos valores de pH, elementos tóxicos como o arsênio (As), se presentes no material, 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).

O As, de acordo com a agência norte-americana para substâncias tóxicas e registro de doenças (AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY, 2011), é o primeiro da lista prioritária das substâncias mais perigosas para a saúde humana. O As pode estar presente em minérios de ouro e a exploração desse metal pode acarretar problemas ambientais. Por essa razão, os resíduos gerados na lavra e no beneficiamento requerem cuidados específicos.

Atualmente, a maior produção de ouro no Brasil é oriunda de uma mina a céu aberto localizada no município de Paracatu - MG. Os minérios explorados em Paracatu apresentam baixos teores de ouro – em média $0,40 \text{ g t}^{-1}$ de ouro (HENDERSON, 2006). Como consequência, grande volume de resíduos contendo As (remanescentes da mineração e rejeitos) é gerado no processamento desses minérios.

Dentre os minérios explorados em Paracatu, o mais superficial (denominado B1) é mais oxidado e possui teores de sulfetos inferiores (cerca de $3,0 \text{ g kg}^{-1}$) aos do minério subjacente, denominado B2. O minério B2 é menos intemperizado e, portanto, com maiores teores de sulfetos (aproximadamente $10,0 \text{ g kg}^{-1}$).

Uma das formas de se recuperar as áreas onde os rejeitos do beneficiamento dos minérios são depositados é a revegetação, sendo a mais adequada ambientalmente. Esses materiais possuem elevada erodibilidade e, assim, sua cobertura é fundamental. Além disso, a revegetação é frequentemente requerida no processo de licenciamento do empreendimento. Entretanto, a revegetação é um processo complexo por causa das características químicas, físicas e biológicas dos rejeitos, que são limitantes ao estabelecimento e crescimento de plantas. Os rejeitos apresentam salinidade elevada e potencial de geração de acidez e de solubilização de elementos como As, Fe e S, o que pode limitar o crescimento de plantas e dificultar o processo de revegetação da área (bacia) nas quais são depositados (SILVA et al., 2004).

A revegetação de substratos sulfetados normalmente envolve a implantação de uma camada selante, a fim de evitar a oxidação do material, seguida de uma camada superficial de solo ou qualquer outro material que permita o estabelecimento e crescimento de plantas (MELLO; DIAS; CORREA, 2003). No entanto, os autores mencionam que podem existir condições em que as características dos substratos permitem a revegetação direta com espécies previamente selecionadas.

Espécies vegetais que possuem tolerância ao As e à salinidade podem, a princípio, apresentar maior potencial para serem utilizadas na revegetação da bacia de depósito dos rejeitos em Paracatu. Desta maneira, é necessário identificar espécies com estas características e, preferencialmente, que pertençam às fases distintas da sucessão ecológica, a fim de prover maior sustentabilidade à área em recuperação.

O Brasil apresenta expressiva diversidade de ecossistemas florestais, dada a sua grande área física e a diversidade de climas e solos presentes em seu território (LEITÃO FILHO, 1987). Por essa razão,

é possível encontrar espécies nativas tolerantes às condições mais adversas de solo e clima. Neri et al. (2011) verificaram que diversas espécies das famílias Leguminosae e Melastomataceae, dentre outras, têm potencial de uso na recuperação dos substratos sulfetados produzidos em Paracatu.

Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de quatro espécies vegetais arbóreas (quaresmeira, paricá, juçara e cássia-rósea) para a revegetação de rejeito salino contaminado com As, denominado rejeito B1, proveniente do beneficiamento de minério de ouro.

MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado como substrato para o plantio consistiu em um rejeito proveniente do beneficiamento de minério de ouro explotado em Paracatu - MG (rejeito B1). O minério (B1) é um filito bastante intemperizado, com teores de sulfetos em torno de 3,0 g kg⁻¹ e granulometria de calhau a argila (ASSIS, 2006).

Para a caracterização inicial do substrato, foram coletadas três amostras para análise. Foram determinados pH em água; teores disponíveis de P, K, S, Fe e Mn e trocáveis de Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e Al³⁺ (EMBRAPA, 2011); fósforo remanescente (ALVAREZ et al., 2000); teor de carbono orgânico total, determinado pelo método adaptado de Yeomans e Bremner (1988) (MENDONÇA; MATOS, 2005), cujos resultados foram multiplicados por 1,724 para obtenção do teor de matéria orgânica (MO); granulometria (EMBRAPA, 2011, adaptado por RUIZ, 2005a; 2005b); capacidade de campo (CC), determinada em extrator de Richards, no potencial de -10 kPa; densidade do substrato (Ds) pelo método da proveta; e densidade de partículas (Dp) pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 2011); teor de As disponível, extraído pelo extrator Mehlich 3 (MEHLICH, 1984) e quantificado com espectrometria de emissão óptica, com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), no comprimento de onda de 193,696 nm.

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em vasos plásticos pretos com orifícios na parte inferior para a drenagem da água. O substrato para o preenchimento dos vasos foi seco ao ar e passado em peneira com malha de 4 mm de abertura. Em seguida, 3,34 kg de substrato (peso seco) foram acondicionados em cada vaso, de forma a se obter um volume de aproximadamente 3,0 dm³.

O substrato de cada parcela foi homogeneizado com uma mistura de CaCO₃ P.A. e MgCO₃ P.A., na proporção Ca:Mg de 4:1, em quantidade equivalente a 1,0 t ha⁻¹, e com fosfato de amônio monobásico P.A., na dose de 450 mg kg⁻¹ de P. Em seguida, o substrato foi umedecido com água deionizada, em quantidade equivalente a 60 % da CC, e incubado em saco plástico por 23 dias.

Após o período de incubação, os substratos foram transferidos para os vasos plásticos e mudas das espécies *Tibouchina granulosa* (quaresmeira), *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke (paricá), *Euterpe edulis* Mart. (juçara) e *Cassia grandis* (cássia-rósea) foram plantadas (uma planta por vaso). Para a formação das mudas, aproximadamente um ano antes do início do experimento, as sementes foram acondicionadas em tubetes contendo substrato orgânico para que germinassem. Os tubetes com as sementes foram mantidos em casa de vegetação, com temperatura variando de 20 a 26°C e com irrigações periódicas. No plantio, as mudas de quaresmeira apresentavam altura média de 26 cm; as de paricá, 15 cm; juçara, 10 cm; e cássia-rósea, 19 cm.

Como o substrato é um material diferente dos solos e não há recomendações de adubação para o mesmo, convencionou-se adubar com 270, 80, 0,833 e 0,266 mg kg⁻¹ de N, K, B e Mo, respectivamente. As doses de N e K foram parceladas em duas aplicações, sendo metade aplicada aos dezessete e metade aos trinta dias após o plantio. A adubação com B e Mo foi realizada em dose única aos dezessete dias após o plantio. Para o suprimento dos nutrientes, foram utilizados nitrato de amônio P.A., cloreto de potássio P.A., borato de sódio P.A. e molibdato de amônio P.A. Na adubação nitrogenada, descontou-se a quantidade de N adicionada via fosfato de amônio monobásico.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro tratamentos (espécies estudadas) e cinco repetições, compostas de uma muda cada. O período experimental compreendeu 120 dias. Durante esse período, os substratos foram irrigados periodicamente com água deionizada, de forma a manter a umidade do substrato próxima à capacidade de campo.

No segundo e em meados do terceiro mês do período experimental, diversas plantas apresentaram sintomas semelhantes aos causados pela deficiência de N (folhas com coloração verde-clara) e K (clorose

e necrose nas bordas das folhas). Por essa razão, na época do aparecimento dos sintomas, os substratos receberam adubações adicionais em quantidades equivalentes a 50 mg kg⁻¹ de N e 25 mg kg⁻¹ de K.

A altura e o diâmetro de colo das plantas foram medidos mensalmente. A primeira medição foi realizada no primeiro dia de cultivo. Foram calculadas as taxas de crescimento absoluto em altura (TCAh) e em diâmetro (TCAd), conforme equações 1 e 2:

$$TCAh = (hf - hi)/t \quad (1)$$

$$TCAd = (df - di)/t \quad (2)$$

Em que: TCAh = taxa de crescimento absoluto em altura (cm dia⁻¹); TCAd = taxa de crescimento absoluto em diâmetro (mm dia⁻¹); hf = altura final (cm); hi = altura inicial (cm); df = diâmetro final (mm); di = diâmetro inicial (mm); t = período experimental (dias).

Ao final do período experimental, as plantas foram retiradas e separadas em partes aérea e radicular. As raízes foram lavadas com água deionizada e solução de detergente neutro (0,1%) e, em seguida, com água deionizada novamente. Após essa etapa, foram lavadas com solução de HCl (3%), terminando a lavagem com água deionizada. A parte aérea foi lavada apenas com água deionizada. Por fim, o material vegetal foi colocado em estufa a 60°C, onde permaneceu até atingir massa constante.

Amostras dos substratos foram secas ao ar e passadas em peneiras com malha de 2 mm de abertura. Foram realizadas as mesmas análises da caracterização inicial, com alteração apenas na determinação do As e do P, conforme descrito abaixo. Determinou-se também a condutividade elétrica do substrato em extrato de pasta saturada (EMBRAPA, 2011). Os conteúdos de As e P na biomassa foram calculados com base nos teores dos elementos e nos valores de matéria seca. Calculou-se, também, o índice de translocação do As (IT) (ABICHEQUER; BOHNEN, 1998), dividindo-se o conteúdo de As na parte aérea pelo conteúdo de As na planta, multiplicado por 100.

Para a determinação dos teores disponíveis de As e P no substrato e dos teores desses elementos na biomassa, amostras de 0,5 g foram digeridas em forno de micro-ondas pressurizado, com 4 mL de ácido nítrico concentrado e 2 mL de peróxido de hidrogênio para as amostras de material vegetal e 10 mL de ácido nítrico concentrado para as amostras de substrato, de acordo com o programa de temperatura estabelecido pelo método USEPA 3051A (ESTADOS UNIDOS, 1998). Em seguida, o volume dos extratos foi completado com água ultrapura para 10 mL (material vegetal) e 25 mL (substrato) e a mistura resultante foi centrifugada a 3000 rpm, por 5 minutos. A quantificação dos teores de As e P foi realizada por ICP-OES, nos comprimentos de onda de 189,042 e 214,914 nm, respectivamente.

Os resultados foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância, sendo as médias de cada espécie comparadas pelo teste de agrupamento de Scott-Knott, a 5% de significância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O substrato possui baixa fertilidade, notadamente pelos baixos teores de P, Ca²⁺, Mg²⁺ e B (ALVAREZ et al., 1999) (Tabela 1). Por outro lado, os teores de Fe e Mn foram classificados como altos e o de S, como muito bom (ALVAREZ et al., 1999), o que está relacionado com a natureza mineralógica do material.

O teor de matéria orgânica (MO) nos substratos possivelmente foi superestimado. O método utilizado na determinação do teor de carbono tem como princípio a oxidação desse elemento. Por essa razão, o resultado pode sofrer interferência de outros elementos que estejam em formas reduzidas e que podem ser igualmente oxidados, como Fe, Mn e S, superestimando o teor de C orgânico.

O predomínio da fração silte e a baixa capacidade de troca catiônica resultam em baixa capacidade total de adsorção de cátions. A umidade na capacidade de campo, que foi de 0,391 g g⁻¹, pode ser considerada elevada para um material que possui apenas 0,036 kg kg⁻¹ de argila. Nesse caso, o silte é o responsável pela retenção de água, devido ao fenômeno da capilaridade.

Os sintomas característicos de toxicidade de As em plantas são murchamento das folhas, crescimento lento de raízes e brotos, necrose e cor arroxeadas nas folhas basais (MELO, 2006). Esses sintomas foram observados em diversas plantas, em diferentes intensidades. É importante ressaltar que as adubações

TABELA 1: Caracterização inicial do substrato utilizado no experimento.

TABLE 1: Initial characterization of the substrate used in the experiment.

pH	P	K	Na	Ca ²⁺	Mg ²⁺	T	PST	MO	P-rem
H ₂ O	mg kg ⁻¹		cmol _c dm ⁻³		%	dag kg ⁻¹	mg L ⁻¹		
4,57	20,7	68	15,2	0,79	0,35	1,78	3,71	0,91	55,1
Fe	Mn	S	As	CC	Ds	Dp	Areia	Silte	Argila
mg dm ⁻³		g g ⁻¹		kg dm ⁻³		kg kg ⁻¹			
1.026	13	141,6	111,9	0,391	1,1	2,4	0,259	0,705	0,036

Em que: pH: relação 1:2,5; P, K, Na, Fe e Mn: extrator Mehlich I; Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺: extrator KCl 1 mol L⁻¹; T: capacidade de troca catiônica; PST: percentagem de sódio trocável = Na x 100 / T; MO: matéria orgânica = carbono orgânico x 1,724; P-rem: fósforo remanescente; S: extrator fosfato monocálcico em ácido acético; As: extrator Mehlich 3; CC: capacidade de campo; Ds: densidade do substrato; Dp: densidade de partículas.

adicionais de N e K tiveram a finalidade de evitar possíveis deficiências nutricionais, de modo a garantir que os sintomas observados nas plantas estivessem associados às características do substrato, como a presença de As e sais. Desse modo, é possível que os sintomas observados nas plantas não tenham sido causados por problemas nutricionais, mas pelos efeitos tóxicos do As e pela salinidade do substrato.

As plantas de paricá apresentaram clorose e necrose em diversos folíolos logo no início do cultivo. No terceiro mês de cultivo, as plantas estavam vigorosas, apresentando pequenas lesões esbranquiçadas nos folíolos, distribuídas de maneira bastante pontual e pouco frequentes, quase imperceptíveis em algumas plantas.

Os folíolos das plantas de cássia-rósea apresentaram coloração avermelhada/arroxeadada logo no início do cultivo. Com dez dias de cultivo, diversos folíolos já estavam completamente necrosados, enquanto outros estavam intactos ou apresentavam clorose e necrose pontuais. Ao terceiro mês, alguns folíolos apresentaram coloração arroxeadada e clorose, com necrose nas extremidades, mas as plantas estavam visualmente vigorosas.

Logo no início do cultivo, as plantas de juçara apresentaram clorose nas folhas, com necrose apenas nas pontas. Com dez dias de cultivo, algumas folhas estavam completamente necrosadas e, as demais, com sintomas pontuais de necrose. No terceiro mês, diversas folhas (mais velhas) apresentaram clorose em todo o comprimento e necrose nas pontas. Ao final do experimento, observou-se que as lesões nas folhas, possivelmente causadas pela toxicidade ao As, foram severas. No entanto, houve constante emissão de novas folhas e nenhuma planta morreu.

A quaresmeira foi a espécie mais prejudicada pelas características do substrato. As folhas, logo na primeira semana de cultivo, apresentaram clorose e necrose, evoluindo das bordas para o centro, e murchamento. Ao final do terceiro mês de cultivo, todas as plantas estavam mortas. Por essa razão, a quaresmeira apresentou redução na altura e no diâmetro (Figura 1), o que resultou em taxas de crescimento absoluto em altura (TCAh) e diâmetro (TCAd) negativas (Tabela 2).

O destacado crescimento do paricá, em relação às demais espécies avaliadas (Tabela 2), é devido às características da própria planta. O paricá é uma espécie que possui rápido crescimento em altura e diâmetro (CARVALHO; VIÉGAS, 2004), sendo uma das árvores brasileiras de mais rápido crescimento que se conhece (LORENZI, 2008).

O cultivo no substrato parece não ter sido limitante ao desenvolvimento da cássia-rósea, como ocorreu com a quaresmeira. A cássia-rósea é uma espécie plástica quanto a solos, ocorrendo naturalmente em solos úmidos, com drenagem boa a lenta e com textura que varia de arenosa a franca (CARVALHO, 2003). Essa característica pode ter favorecido seu estabelecimento no substrato.

As plantas de juçara apresentaram sintomas que podem ser de toxicidade de As, o que limitaria o uso dessa espécie na revegetação do substrato. É importante ressaltar que mesmo tendo sido observados esses sintomas, nenhuma planta morreu durante o período experimental e o seu crescimento em diâmetro

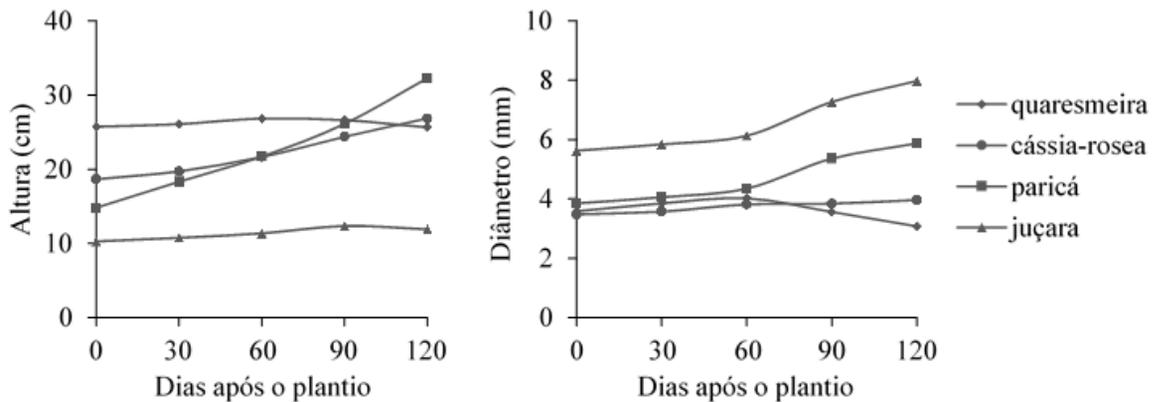


FIGURA 1: Altura e diâmetro das plantas avaliadas em função do tempo de cultivo.
 FIGURE 1: Height and diameter of plants evaluated as a function of cultivation time.

TABELA 2: Médias de matéria seca da parte aérea (MSA), radicular (MSR) e total (MST), altura (h) e diâmetro (d) aos 120 dias e taxas de crescimento absoluto em altura (TCAh) e diâmetro (TCAd) das espécies avaliadas, após 120 dias de cultivo.

TABLE 2: Average of shoot (MSA), root (MSR) and total (MST) dry matter, height (h) e diameter (d) at 120 days and absolute growth rates in height (TCAh) e diameter (TCAd) of species evaluated after 120 days of cultivation.

Espécie	MSA	MSR	MST	h	d	TCAh	TCAd
	g/vaso	g/vaso	g/vaso	cm	mm	cm dia ⁻¹	mm dia ⁻¹
Quaresmeira	1,19b	0,33b	1,52c	25,6b	3,1c	-0,0008c	-0,0044c
Paricá	6,53a	2,07a	8,60a	32,3a	5,9b	0,1454a	0,0168a
Juçara	1,75b	0,88b	2,64c	11,9c	8,0a	0,0136c	0,0198a
Cássia-rósea	2,59b	2,15a	4,75b	26,9b	4,0c	0,0682b	0,0042b
CV (%)	26,28	31,43	23,78	15,68	19,60	40,37	52,91

Em que: Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste de agrupamento de Scott-Knott, a 5% de significância.

parece não ter sido comprometido. Uma característica que pode ter favorecido o estabelecimento da juçara no substrato é a sua pouca exigência quanto às características edáficas, pois trata-se de uma espécie que se desenvolve em solos ácidos (pH entre 4,1 e 5,6), pobres em P, Ca, K e Mg e com drenagem de boa a regular (CARVALHO, 2003).

A juçara possui sistema radicular fasciculado, profundo, com várias ramificações secundárias (CARVALHO, 2003). No entanto, essas características não foram observadas no presente estudo, pois suas raízes ficaram concentradas na porção central dos vasos. Da mesma forma ocorreu com as raízes da quaresmeira. Diferentemente, o sistema radicular do paricá e da cássia-rósea, que é pivotante, se distribuiu em todo o volume do substrato, o que pode indicar maior tolerância dessas espécies às características do substrato.

Paricá, juçara e cássia-rósea acumularam o As, preferencialmente, em suas raízes (Tabela 3). O teor de As na cássia-rósea chegou a ser treze vezes maior na raiz, em relação à parte aérea. Diferente do As, o P foi acumulado predominantemente na parte aérea das plantas, o que está relacionado às suas funções metabólicas. O P desempenha papel importante na fotossíntese, na respiração e no armazenamento e transferência de energia (DECHEN; NACHTIGALL, 2007), processos esses que ocorrem nas folhas.

A baixa translocação de As pode ter favorecido o crescimento das plantas de paricá e cássia-rósea

TABELA 3: Médias dos teores e conteúdos de arsênio e fósforo e índice de translocação de arsênio (IT) na matéria seca das espécies avaliadas, após 120 dias de cultivo.

TABLE 3: Average of concentrations and contents of arsenic and phosphorus and translocation of arsenic (IT) in the dry matter of species evaluated after 120 days of cultivation.

Espécie	Teor de As		Conteúdo de As			IT
	Parte aérea	Raiz	Parte aérea	Raiz	Total	
	mg kg ⁻¹		mg/planta			%
Quaresmeira	12,81a	45,34b	0,015b	0,014d	0,030c	51a
Paricá	7,30b	62,42a	0,046a	0,129a	0,175a	27b
Jussara	5,79b	44,79b	0,010b	0,038c	0,049c	20b
Cássia-rósea	2,49c	32,62b	0,006b	0,068b	0,075b	8c
CV (%)	32,42	27,55	32,27	27,98	20,28	30,10

Espécie	Teor de P		Conteúdo de P		
	Parte aérea	Raiz	Parte aérea	Raiz	Total
	dag kg ⁻¹		mg/planta		
Quaresmeira	0,135b	0,117b	1,602b	0,378c	1,979b
Paricá	0,066c	0,103b	4,263a	2,117a	6,380a
Jussara	0,185a	0,244a	3,270a	2,052a	5,322a
Cássia-rósea	0,060c	0,063b	1,568b	1,360b	2,928b
CV (%)	19,30	40,39	27,30	31,09	26,09

Em que: Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste de agrupamento de Scott-Knott, a 5% de significância

(Tabela 3), uma vez que esse é um dos mecanismos de tolerância ao metaloide. Por outro lado, o elevado teor de As na parte aérea da quaresmeira pode ter sido a principal causa da morte das plantas. O arsenato, como é quimicamente análogo ao fosfato, interfere nas reações vitais de fosforilação, pois se liga à ADP, formando ADP-As, prejudicando a biossíntese de ATP, o que provoca alterações no fluxo energético das células das plantas (HUGHES, 2002; MEHARG; HARTLEY-WHITAKER, 2002). Segundo Nascimento (2007), a tolerância ao As está relacionada à manutenção das funções fotossintéticas e, portanto, quanto menor o transporte do As para a parte aérea, menor o comprometimento da taxa fotossintética e maior a tolerância da planta.

O arsenato absorvido pela planta é reduzido a arsenito, que tem elevada afinidade com os grupos tiol de peptídeos (HUANG et al., 2008; MELENDEZ, 2006; SNELLER et al., 1999; SRIVASTAVA; MA; SANTOS, 2006; ZHAO et al., 2008). A complexação de arsenito por tióis é um importante mecanismo de desintoxicação de As, podendo diminuir a sua translocação, especialmente se os complexos forem sequestrados nos vacúolos de células radiculares (SU et al., 2008). A elevada translocação de As na quaresmeira pode ser resultado da baixa capacidade de complexação do metaloide nas células radiculares.

Nascimento (2007) avaliou respostas fisiológicas das espécies *Stizolobium aterrimum* (L.) e *Canavalia ensiformis* (DC.) ao As, ambas da família Fabaceae. O autor verificou que os teores de As nas raízes foram sempre superiores aos da parte aérea. Zhao et al. (2008) citam que a explicação para a limitada translocação de As é que o arsenato é rapidamente reduzido a arsenito e, em seguida, se liga a tióis de algumas moléculas, como as fitoquelatinas, sendo sequestrado nos vacúolos das raízes. Assim, a adaptação de plantas para resistir a elevados níveis de arsenato depende da produção indispensável de complexos As-fitoquelatinas (HARTLEY-WHITAKER et al., 2001). As fitoquelatinas são peptídeos ricos em grupos tiol, capazes de se ligar a diversos elementos, como Cd, Cu, Zn e As (INOUE, 2005).

Após o período experimental, os substratos apresentaram baixos teores de Ca²⁺ nos tratamentos com quaresmeira e paricá (Tabela 4), sendo médios para as demais espécies (ALVAREZ et al., 1999). No

primeiro caso, as plantas de quaresmeira e paricá podem ter absorvido o nutriente em maiores quantidades. Os teores de Mg^{2+} foram classificados como muito bons em todos os tratamentos. Mesmo com a adubação, os teores de K reduziram bastante, sendo classificados como muito baixos após o período experimental, o que está relacionado com a absorção pelas plantas. Os teores de Fe reduziram após o período experimental, mas permaneceram altos. Já os teores de Mn e S se elevaram, sendo classificados como altos e muito bons, respectivamente.

Houve diferença significativa nos valores de condutividade elétrica (CE) dos substratos após o período experimental (Tabela 4). O maior valor de CE foi obtido no substrato com as plantas de quaresmeira. Como o substrato utilizado para o plantio foi o mesmo, a explicação para essa diferença é a absorção de parte dos sais pelas plantas das outras espécies.

Richards (1954) classificou solos salinos como sendo aqueles que apresentam CE maior ou igual a $4,0 \text{ dS m}^{-1}$ e percentagem de sódio trocável (PST) menor que 15%, com pH menor que 8,5. Apenas o substrato com quaresmeira atendeu a essas condições e, portanto, foi classificado como salino. A salinidade do substrato possivelmente foi uma das causas da morte das plantas.

O murchamento das folhas da quaresmeira pode ter sido causado, principalmente, pela salinidade do substrato. Adicionalmente, a murcha foliar pode ter sido intensificada por alterações nas relações hídricas devido, provavelmente, à ação inibitória do As sobre a H^+ -ATPase mitocondrial, comprometendo a produção de energia e, conseqüentemente, a absorção de íons, e/ou ao comprometimento das células do sistema radicular, levando à alteração na absorção de água (NASCIMENTO, 2007).

Paricá (MARQUES et al., 2004) e quaresmeira (BRAGA et al., 1995) possuem alta exigência nutricional, acumulando elevados teores de nutrientes em sua biomassa. Apesar disso, as plantas de paricá avaliadas no presente estudo não apresentaram sintomas de deficiência nutricional, sugerindo que as doses de adubos utilizadas foram suficientes para a nutrição das mesmas, dentro das condições avaliadas. Sob as mesmas condições de adubação, a quaresmeira não conseguiu se desenvolver e isso está mais relacionado à

TABELA 4: Médias dos atributos químicos e físico-químico dos substratos das espécies avaliadas, após 120 dias de cultivo.

TABLE 4: Average of chemical and physico-chemical attributes of the substrates of species evaluated after 120 days of cultivation.

Espécie	pH	P	K	Na	Ca ²⁺	Mg ²⁺	T	PST
	H ₂ O	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³		%
Quaresmeira	5,1a	397,4b	9a	4b	0,61b	2,13b	4,46b	0,35b
Paricá	5,0a	652,8a	11a	10a	0,95b	1,69b	5,68b	0,75a
Juçara	4,9a	458,5b	8a	4b	1,30a	2,32b	5,76b	0,32b
Cássia-rósea	4,9a	487,9b	10a	4b	1,54a	2,89a	7,26a	0,22b
CV (%)	3,63	14,56	66,80	41,30	28,76	20,40	17,42	65,78
	MO	P-rem	Fe	Mn	S	As		CE
	dag kg ⁻¹	mg L ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³		dS m ⁻¹
Quaresmeira	0,52b	26,0a	678,1a	58,4a	599,7a	319,2a		4,25a
Paricá	1,47a	26,5a	609,3a	56,9a	614,2a	373,4a		3,39b
Juçara	0,57b	23,2a	664,7a	47,5b	618,6a	367,7a		3,57b
Cássia-rósea	0,79b	25,5a	824,4a	62,8a	580,8a	367,2a		3,60b
CV (%)	38,58	16,54	31,88	12,20	10,49	15,49		9,39

Em que: pH: relação 1:2,5; K, Na, Fe e Mn: extrator Mehlich I; Ca²⁺ e Mg²⁺: extrator KCl I mol L⁻¹; T: capacidade de troca catiônica; PST: percentagem de sódio trocável = $Na \times 100 / T$; MO: matéria orgânica = carbono orgânico $\times 1,724$; P-rem: fósforo remanescente; S: extrator fosfato monocálcico em ácido acético; As e P: método USEPA 3051A, determinação por ICP-OES. Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste de agrupamento de Scott-Knott, a 5% de significância.

salinidade e à presença do As no substrato do que a fatores nutricionais. Braga et al. (1995) verificaram que o teor de P na matéria seca da parte aérea das quaresmeiras avaliadas foi de 0,170 dag kg⁻¹ quando as plantas foram adubadas com macro e micronutrientes, valor este próximo ao obtido no presente estudo.

O paricá possui uma característica importante para a revegetação da bacia de rejeitos em Paracatu, que é a capacidade de tolerar condições de deficiência hídrica. Carvalho (2005) verificou que o *deficit* hídrico induziu o surgimento de mecanismos de tolerância à seca no paricá. Segundo o autor, a maior capacidade de adaptação do paricá favorece o crescimento e a formação de biomassa nas épocas secas. Desse modo, além de ter apresentado os melhores resultados de produção de biomassa, taxas de crescimento e acúmulo de As, o paricá possui, ainda, a capacidade de se desenvolver mesmo em períodos secos. Isso reforça o potencial dessa espécie para a revegetação da bacia.

Dentre as espécies avaliadas, o paricá foi a que apresentou o maior potencial de uso para a revegetação do substrato. O paricá é uma espécie de rápido crescimento, pioneira, sendo indicada para plantios a pleno sol (ROSA, 2006). Suas características ecológicas possibilitam a sua inclusão no grupo de espécies recomendadas para iniciar a revegetação. Mesmo sendo nativo da Amazônia, e o município de Paracatu pertencente ao bioma Cerrado, deve-se considerar a possibilidade de uso do paricá no processo de revegetação, dado o seu potencial para esse fim.

CONCLUSÕES

O potencial de uso das espécies para a revegetação do rejeito segue a ordem paricá > cássia-rósea. Dentre as espécies avaliadas, o paricá é a que apresenta o maior potencial para a implantação inicial de vegetação, demonstrando maior capacidade de adaptação às características do rejeito.

As espécies juçara e quaresmeira não são recomendadas para a revegetação do rejeito. Possivelmente, o arsênio e/ou a salinidade comprometem o desenvolvimento das plantas, sendo letais para a quaresmeira.

AGRADECIMENTOS

A Kinross Gold Corporation, por disponibilizar materiais e recursos para a execução deste trabalho. Aos prezados professores Renato Campello Cordeiro, da Universidade Federal Fluminense, e Ricardo Erthal Santelli, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pela valiosa contribuição na realização das análises laboratoriais e pela solicitude a todo momento. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão de bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 1, p. 21-26, 1998.
- AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. **Substance Priority List**. 2011. Disponível em: <http://www.atsdr.cdc.gov/spl/resources/ATSDR_2011_SPL_Detailed_Data_Table.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2013.
- ALVAREZ, V. V. H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. p. 25-32.
- ALVAREZ, V. V. H. et al. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000.
- ASSIS, I. R. **Mitigação da lixiviação de arsênio, ferro e enxofre e revegetação de substratos minerados em área de ocorrência de drenagem ácida**. 2006. 90 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.
- BLOWES, D. W. et al. Geochemical, mineralogical and microbiological characterization of sulphide-bearing carbonate-rich gold-mine tailings impoundment, Joutel, Québec. **Applied Geochemistry**, Mainz, v. 13, n. 6, p. 687-705, 1998.

- BRAGA, F. A. et al. Requerimentos nutricionais de quatro espécies florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 19, n. 1, p. 18-31, 1995.
- CARVALHO, C. J. R. Respostas de plantas de *Schizolobium amazonicum* (*S. parahyba* var. *amazonicum*) e *Schizolobium parahyba* (*Schizolobium parahybum*) à deficiência hídrica. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 6, p. 907-914, 2005.
- CARVALHO, J. G.; VIEGAS, I. J. M. **Caracterização de sintomas de deficiências de nutrientes em paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke)**. Belém: EMBRAPA-CPATU, 2004. 6 p. (Circular Técnica, n. 37).
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Floresta, 2003. v. 1.
- DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 91-132.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2011. 225 p.
- ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. **Method 3051A: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils**. Office of Solid Waste, U. S. Washington: Environmental Protection Agency, 1998. p. 1-20.
- HARTLEY-WHITAKER, J. et al. Phytochelatin are involved in differential arsenate tolerance in *Holcus lanatus*. **Plant Physiology**, Rockville, v. 126, p. 299-306, 2001.
- HENDERSON, R. D. **Paracatu Mine Technical Report. Kinross Gold Corporation**. 2006. Disponível em: <<http://www.kinross.com/pdf/operations/Technical-Report-Paracatu.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2014.
- HUANG, Z. C. et al. Difference of toxicity and accumulation of methylated and inorganic arsenic in arsenic-hyperaccumulating and -hypertolerant plants. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 42, n. 14, p. 5106-5111, 2008.
- HUGHES, M. F. Arsenic toxicity and potential mechanisms of action. **Toxicology Letters**, Amsterdam v. 133, p. 1-16, 2002.
- INOUE, M. Phytochelatin. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campos dos Goytacazes, v. 17, n. 1, p. 65-78, 2005.
- LEITÃO FILHO, H. F. Considerações sobre a florística de florestas tropicais e sub-tropicais do Brasil. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 35, p. 41-46, 1987.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 5. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2008. v. 1.
- MARQUES, T. C. L. S. M. et al. Exigências nutricionais do paricá (*Schizolobium amazonicum*, Herb.) na fase de muda. **Cerne**, Lavras, v. 10, n. 2, p. 167-183, 2004.
- MEHARG, A. A.; HARTLEY-WHITAKER, J. Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species. **New Phytologist**, Lancaster, v. 154, p. 29-43, 2002.
- MEHLICH, A. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Missouri, v. 15, n. 12, p. 1409-1416, 1984.
- MELLENDEZ, L. B. **Estudo sobre a associação de metais com bioligantes em plantas por SEC-ICPMS**. 2006. 107 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.
- 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: Folha de Viçosa, 1998. p. 45-57.
- MELLO, J. W. V.; DIAS, L. E.; CORREA, M. L. T. Drenagem ácida: Avaliação do potencial de ocorrência, mitigação e revegetação de substratos sulfetados. In: CURI, N. et al. (Eds). **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 3. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. p. 401-430.
- MELO, R. F. **Potencial de espécies vegetais para fitorremediação de um solo contaminado por arsênio**. 2006. 107 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005. 107 p.
- NASCIMENTO, K. J. T. **Fotossíntese, trocas gasosas e respostas antioxidativas em *Canavalia ensiformis* e *Stizolobium aterrimum* submetidas a níveis tóxicos de arsênio**. 2007. 47 f. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

- NERI, A. V. et al. Espécies de Cerrado com potencial para recuperação de áreas degradadas por mineração de ouro, Paracatu-MG. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 4, p. 907-918, 2011.
- RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: United States Salinity Laboratory Staff, 1954. 160 p. (USDA Agriculture Handbook, 60).
- ROSA, L. S. Ecologia e silvicultura do paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) na Amazônia brasileira. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 45, p. 135-174, 2006.
- RUIZ, H. A. Dispersão física do solo para análise granulométrica por agitação lenta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005a. CD-ROM.
- RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, p. 297-300, 2005b.
- SHU, W. S. et al. Acidification of lead/zinc mine tailings and its effect on heavy metal mobility. **Environment International**, Elmsford, v. 26, p. 389-394, 2001.
- SILVA, S. R. et al. Caracterização de rejeito de mineração de ouro para avaliação de solubilização de metais pesados e arsênio e revegetação local. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 1, p. 189-196, 2004.
- SNELLER, F. E. C. et al. Toxicity of arsenate in *Silene vulgaris*, accumulation and degradation of arsenate-induced phytochelatins. **New Phytologist**, Lancaster, v. 144, n. 2, p. 223-232, 1999.
- SRIVASTAVA, M.; MA, L. Q.; SANTOS, J. A. G. Three new arsenic hyperaccumulating ferns. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 364, p. 24-31, 2006.
- SU, Y. H. et al. Highly efficient xylem transport of arsenite in the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata*. **New Phytologist**, Lancaster, v. 180, n. 2, p. 434-441, 2008.
- YEOMANS, J. C.; BREMMER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Missouri, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.
- ZHAO, F. J. et al. Arsenic uptake and metabolism in plants. **New Phytologist**, Lancaster, v. 181, n. 4, p. 777-794, 2008.