



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Efeito de doses de fósforo na mobilidade do arsênio e no desenvolvimento de duas essências florestais

Roseli Freire de Melo¹, Luiz Eduardo Dias², Igor Rodrigues de Assis², Norivaldo dos Anjos³

¹ Engenheira Agrônoma, D.Sc. Pesquisadora – EMBRAPA- Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (CPATSA), Caixa Postal 23, Cep. 56302-970- Petrolina-PE, Zona Rural, roseli.melo@embrapa.br

² Prof. Depto. de Solos UFV. ledias@ufv.br, igorassis@hotmail.com, Pesquisador CNPq. UFV, CEP 36570-000, Viçosa-MG.

³ Prof. Depto. de Entomologia, UFV, nanjos@ufv.br

Artigo recebido em 13/09/2017 e aceito em 29/03/2018

RESUMO

O arsênio (As) é o elemento químico mais nocivo à saúde humana. A recuperação de áreas com presença de As requer utilização de espécies tolerantes e manejo adequado da adubação, especialmente do fósforo (P). Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a interação de doses As e P no desenvolvimento de mudas das espécies florestais ingá (*Inga edulis* Mart.) e angico-vermelho [*Anadenanthera peregrina* (L.) Speg.]. O delineamento utilizado foi em blocos casualizados, com três repetições, em esquema fatorial 5 x 3, sendo 5 doses de As (0, 100, 200, 400 e 800 mg dm⁻³) e 3 doses de P (0, 150 e 450 mg dm⁻³) com três repetições. As variáveis analisadas foram matéria seca, altura e diâmetro das plantas e análise do néctar produzido pelas plantas. Aos 10 dias de cultivo as plantas de ingá apresentaram as bordas das folhas basais arroxeadas com clorose internerval, seguida de necrose, apenas nas doses de 400 e 800 mg dm⁻³ de As e na ausência de P. Isto evidencia que o P reduz a toxicidade das plantas ao As, mesmo em doses elevadas. Por outro lado, as doses crescentes de arsênio, mesmo na presença do P, contribuíram para reduzir significativamente as variáveis de crescimento como produção de matéria seca de raízes e parte aérea, altura e diâmetro de planta. O aumento das doses de P para cada dose de As resultou no aumento das variáveis de crescimento, principalmente nas plantas de angico. O efeito tóxico do As varia com as espécies, levando-se em consideração os sintomas de toxidez foliar e as variáveis de crescimento analisadas. As plantas de angico apresentaram-se mais tolerantes que as de ingá. Na avaliação do néctar coletado constatou-se que tais espécies florestais podem absorver transportar e eliminar parte do arsênio através dos nectários foliares, provavelmente, como mecanismo de eliminação desse metalóide. Maiores teores de As no néctar foram encontrados em angico-vermelho (40,50 mg kg⁻¹), enquanto o ingá apresentou teor médio de 3,24 mg kg⁻¹, para a combinação 100 mg dm⁻³ de As e ausência de P, ambos valores acima do permitido em mel para consumo humano.

Palavras chave: fitorremediação, arsenato, toxicidade, ingá, angico-vermelho.

Phosphorus doses effect on the arsenic mobility and the development of two forest essences

ABSTRACT

Arsenic (As) is the chemical element most harmful to human health. Rehabilitation of areas with As presence requires the use of tolerant species and adequate fertilization management, especially phosphorus (P). Therefore, this work aims to evaluate the As and P interaction in the seedlings development of species inga (*Inga edulis* Mart.) and angico-vermelho [*Anadenanthera peregrina* (L.) Speg.]. The experimental design was a randomized complete block, with three replications, in a 5 x 3 factorial scheme. We used 5 doses of As (0, 100, 200, 400 and 800 mg dm⁻³) and 3 doses of P (0, 150 and 450 mg dm⁻³). The analyzed variables were dry matter, height and diameter of the plants and nectar produced by plants. At 10 cultivation days, the ingá plants presented the basal leaves margins purplish with internerval chlorosis, followed by necrosis, only at 400 and 800 mg dm⁻³ of As and in the P absence. This shows P reduces As toxicity to plants, even at high doses. On the other hand, increasing arsenic doses, even in the P presence, contributed to significantly decrease of roots and shoot dry matter production, height and plant diameter. Increasing P doses for each As dose resulted in increased growth variables, especially in angico plants. The As toxic effect varies according to species, taking into account the symptoms of leaf toxicity and the growth variables analyzed. The angico plants were more tolerant than inga. Booth forest species can absorb, transport and eliminate part of the arsenic through the foliar nectaries, probably, as an elimination mechanism of this metalloid. Higher As-levels in nectar were found in angico (40.50 mg kg⁻¹), while the ingá presented mean content of 3.24

mg kg⁻¹, for the combination of 100 mg dm⁻³ of As and P absence, both values above that allowed in honey for human consumption.

Keywords: phytoremediation, arsenate, toxicity, inga, angico

Introdução

O arsênio (As) no ambiente é derivado de fontes natural e antropogênica. A ciclagem biogeoquímica de As e o fluxo natural desse elemento na biosfera têm sido alterados em função da crescente atividade de mineração e uso de pesticidas e conservantes de madeiras entre outros, que resultam na contaminação do solo e demais componentes dos ecossistemas. Grandes esforços têm sido realizados visando à recuperação de solos contaminados com As, sendo uma das alternativas para isso o emprego de plantas tolerantes com potencial para extração ou estabilização do contaminante, processo conhecido por fitorremediação (Accioly e Siqueira, 2000; Felipe et al., 2009; Favas e Pratas, 2015).

A concentração de As na maioria das plantas é inferior a 10 mg kg⁻¹ acumulado primeiramente no sistema radicular (Matschullat, 2000). O As é um elemento não essencial às plantas, sendo que em geral as espécies inorgânicas são altamente fitotóxica. O arsenato é a espécie predominante nos solos em condições aeróbicas, visto que o arsenito predomina em condições anaeróbicas (Smith et al., 1998).

O As e o fósforo (P) têm propriedades químicas similares; conseqüentemente, tem comportamentos semelhantes no solo (Antelo et al., 2015). O P e o As podem competir pelos mesmos sítios de adsorção do solo e absorção pela planta (Adriano, 2001). Estudos indicam que o P adicionado ao solo pode aumentar a fitotoxicidade

liberando mais As para solução (Jacobs e Keeney, 1970, Campos, et al., 2013).

Na planta o arsenato pode interferir no metabolismo do fosfato, visto que no seu interior o arsenato é convertido a arsenito que reage com os grupos sulfídril de enzimas e proteínas conduzindo a inibição das funções da célula resultando em morte dos tecidos celulares (Meharg e Hartley-Whitaker, 2002). Estudos com plantas mostram que arsenato é translocado pelo mesmo sistema de transporte do fosfato e que a presença de fosfato reduz a absorção do arsenato devido a elevada afinidade do sistema de absorção pelo fosfato (Meharg e Hartley-Whitaker, 2002). O efeito competitivo entre arsenato e fosfato nos solos tem sido demonstrado em diversas pesquisas e em vários países do mundo, porém em condições tropicais são escassos estudos dessa natureza.

Por outro lado, alguns estudos têm demonstrado que o fósforo pode reduzir os efeitos tóxicos do arsenato melhorando a nutrição das plantas com fosfato (Sneller et al., 1999; Tu e Ma, 2003), porém esse comportamento parece depender do tipo de solo e da espécie vegetal. Assim, a presença de fósforo em solos contaminado pode representar um papel importante na fitoextração de elementos tóxicos, como o As. O presente estudo objetivou avaliar a influência do P na disponibilidade de As e o potencial de fitoextração de duas espécies florestais ingá (*Inga edulis* Mart.) e angico-vermelho [*Anadenanthera peregrina* (L.) Speg.] em condições controladas.

Material e métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa – UFV, no período de fevereiro a maio de 2005, utilizando-se mudas de ingá e angico-vermelho com aproximadamente um mês de idade. O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) com textura argilo-arenoso, coletado a uma profundidade de 0 - 20 cm (Tabela 1). O delineamento utilizado foi em blocos casualizados, com três repetições, em esquema

fatorial completo 5 x 3, sendo 5 doses de As (0, 100, 200, 400 e 800 mg dm⁻³) e 3 doses de P (0, 150 e 450 mg dm⁻³), os experimentos foram realizados separadamente para cada espécie. As amostras foram destorroadas, peneiradas (4 mm) e incubadas por 15 dias com todas as combinações de As x P, utilizando-se como fontes de As o arsenato de sódio e de P uma mistura de fosfato de potássio, fosfato de amônio e fosfato de cálcio, de forma a fornecer quantidades iguais de N, K e Ca em todos os tratamentos.

Tabela 1. Caracterização química e física da amostra de solo utilizada no experimento

pH H₂O	P-rem	As-rem	P⁽¹⁾	K⁽¹⁾	Ca⁽²⁺⁴⁾	Mg²⁺⁽²⁾	Al³⁺⁽²⁾	H+Al⁽³⁾	M.O
 mg L ⁻¹mg dm ⁻³		————— cmolc dm ⁻³ —————			dag kg ⁻¹	
5,2	26,29	27,82	1,10	25	0,00	0,00	1,32	4,50	2,01

Areia grossa⁽⁴⁾	Areia fina⁽⁴⁾	Silte⁽⁴⁾	Argila⁽⁴⁾	Dens. Aparente⁽⁵⁾	Classe textural	Equiv. Umidade⁽⁵⁾
————— % —————		—————		g cm ⁻³		kg kg ⁻¹
40	17	2	41	1,29	Argilo-arenoso	0,13

1/ Extrator Mehlich I (Mehlich, 1978); 2/ Extrator KCl 1 mol/L; 3/ Acidez potencial a pH 7,0 extraída com acetato de cálcio 1 mol L⁻¹; 4/ Método da pipeta (EMBRAPA, 1997); 5/ EMBRAPA (1997); LVA - Latossolo Vermelho e Amarelo; P-rem – Fósforo remanescente e As-Rem- arsênio remanescente do solo, conforme Alvarez et al. (2001) e Ribeiro Jr (2002), respectivamente.

Testes preliminares realizados no laboratório de Solos da Universidade Federal de Viçosa, contendo amostras de solo incubadas com doses de As (0, 100, 200, 400 e 800 mg dm⁻³) por um período de 15 dias constatou-se que as doses resultaram na disponibilidade de 0,0; 25,42; 58,88; 188,88 e 382,95 mg dm⁻³ para As e de 2,56; 72,13 e

221,37 mg dm⁻³ para P, respectivamente, pelo extrator Mehlich-3. Os valores de As disponível foram superiores ao valor de referência de qualidade para solos do Estado de Minas Gerais, que é de 8,0 mg kg⁻¹ (COPAM, 2011), e ao limite de As disponível no solo (12 mg kg⁻¹), no caso dos EUA,

para que se iniciem ações de remediação (Chen et al., 2001).

Após o período de 15 dias de incubação com o As e P, amostras de 1,5 dm³ de solo foram acondicionadas em vasos plásticos e as mudas transplantadas. O fornecimento de P e a fertilização básica foram efetuados via sais p.a. (puro para análise), e balanceados de maneira que apenas a quantidade de P variou (tratamento), permanecendo os demais nutrientes nivelados em todos os tratamentos.

A adubação com macronutrientes foi realizada no momento do transplântio, na forma de soluções, contendo 60 mg dm⁻³ de N, 100 mg dm⁻³ de K e 50 mg dm⁻³ de Mg. A adubação nitrogenada foi parcelada em duas etapas; no momento do transplântio e quarenta e cinco dias após, para ambas as espécies.

As adubações com micronutrientes foram realizadas na forma de soluções, as quais foram parceladas equitativamente em quatro aplicações (15, 30, 45 e 60 dias após o transplântio), nas doses totais de 0,81; 3,66; 4,00; 1,33; 0,15 e 1,56 mg dm⁻³ de B, Mn, Zn, Cu, Mo e Fe, respectivamente (Alvarez, 1974).

Aos 80 dias de exposição aos tratamentos foi coletado o néctar nos nectários foliares em ambas as espécies, com auxílio de micropipetador. O néctar coletado foi analisado quanto aos teores de As em espectrometria de emissão atômica com plasma induzido em argônio (ICP-OES).

Para a determinação do incremento de altura e diâmetro foram realizadas as medições do diâmetro a altura do colo e da altura no momento do transplântio e 90 dias após. Na sequência, as plantas foram cortadas rente ao coleto e o material

vegetal separado em folhas jovens (FJ), folhas intermediárias (FI), folhas basais (FB), caule (C), e raízes (R). Para a separação dos diferentes tipos de folhas, consideraram-se folhas jovens as folhas tenras, não expandidas completamente, mais os brotos; as folhas basais foram aquelas maduras e em estágio de senescência (amareladas) e folhas intermediárias as demais. Para determinação do peso da matéria seca, as diferentes partes da planta foram secas em estufas de circulação forçada de ar, a 65 °C, até peso constante.

Para determinar a concentração de As e P nas diferentes partes das plantas, amostras de 1,00 g de material seco e finamente triturado foram submetidas à digestão nitricoperclórica (Tedesco et al., 1995). As amostras foram levadas para bloco digestor controlando-se a temperatura: inicialmente de 50 °C, por aproximadamente 30 min.; 100 °C, por mais 30 min. e permaneceu entre 160 a 180 °C até completar a digestão. A dosagem dos teores totais de As e P nos extratos das plantas foram realizadas por ICP-OES no comprimento de ondas de 193,696 e 214,910 nm, respectivamente.

Para fins de avaliação da eficiência do método de determinação de As em material vegetal foi utilizado um padrão de referência de As, GBW07603 composto por ramos e folhas de arbustos cultivadas em áreas de mineração de zinco e chumbo na China, adquirida do Institute of Geophysical and Geochemical Exploration-Langtang-China. A taxa de recuperação de As da amostra padrão foi de 94 %.

Em função da quantidade acumulada de As nos diferentes compartimentos das plantas, as espécies foram classificadas quanto ao caráter de tolerância, em espécies com potenciais para

fitoestabilização (tolerantes e acumuladoras de As nas raízes) e fitoextração (espécies tolerantes e acumuladoras de As na parte aérea). As espécies foram consideradas acumuladoras quando as concentrações nas raízes e parte aérea foram superiores à concentração do solo (Accioly e Siqueira, 2000).

Os resultados para as plantas estudadas de ingá e angico foram submetidos à análise de variância e ajustados por equações de regressão, utilizando-se o programa de análises estatísticas SAS.

Resultados e discussão



a)



b)

Figura 1. Sintomas de toxicidade ao As em folhas basais de plantas de angico-vermelho (a) e ingá (b) na dose de 800 mg dm^{-3} , dez dias após o transplantio (Melo, 2005)

Houve efeito significativo na interação das doses de As e P para todas as variáveis analisadas, em ambas as espécies (Tabela 2). O crescimento em altura variou significativamente ajustando-se equações do tipo raiz quadrada, linear e quadrática, em função das doses de P e As. A presença de fósforo não contribuiu para reduzir os efeitos das

doses de As sob a altura das plantas para ambas as espécies, quando comparado com a testemunha (Tabela 2 e 3). Segundo Meharg e Hartley-Whitaker (2002), o fosfato reduz a absorção do arsenato devido a elevada afinidade do sistema de absorção pelo fosfato, porém esse comportamento parece ser diferenciado entre as espécies.

Tabela 2. Resumo da análise de variância referente à matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca de raízes (MSRA) altura de planta (ALP), diâmetro do colo (DC) e incremento em altura e diâmetro

Fator de variação	Quadrado Médio							ns: não
	GL	MSPA	MSRA	ALP	DC	Incremento		
						Altura	Diâmetro	
Angico-vermelho								
Blocos	2	0,66 ^{ns}	0,73 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,71 ^{ns}	0,01 ^{ns}	
PL	1	13,54 ^{**}	0,39 ^{ns}	524,80 ^{**}	3,86 ^{**}	730,73 ^{**}	2,53 ^{**}	
Pq	1	2,01 ^{**}	0,78 ^{ns}	9,64 ^{***}	2,65 ^{**}	19,81 ^{**}	0,17 ^{ns}	
AsxP0	4	22,94 ^{**}	24,84 ^{**}	182,83 ^{**}	0,35 [*]	146,58 ^{**}	0,48 ^{**}	
AsxP150	4	42,86 ^{**}	62,26 ^{**}	180,67 ^{**}	0,36 [*]	169,61 ^{**}	0,31 ^{**}	
AsxP450	4	25,08 ^{**}	38,14 ^{**}	688,83 ^{**}	0,59 ^{**}	735,21 ^{**}	1,78 ^{**}	
Resíduo	28	0,49	0,36	2,40	0,11	1,62	0,06	
Media geral		9,21	11,88	45,89	6,11	20,42	2,52	
CV(%)		7,60	5,02	3,38	5,35	6,24	9,88	
Ingá								
Blocos	2	3,56 ^{ns}	0,53 ^{ns}	1,35 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,16 ^{ns}	
PL	1	17,17 ^{**}	31,74 ^{**}	1,94 ^{ns}	1,12 [*]	60,67 ^{**}	0,96 ^{**}	
Pq	1	6,87 [*]	3,02 ^{**}	28,23 ^{**}	2,50 ^{**}	18,34 ^{**}	0,27 ^{ns}	
AsxP0	4	9,77 ^{**}	10,18 ^{**}	21,57 ^{**}	0,67 [*]	55,48 ^{**}	0,05 ^{ns}	
AsxP150	4	75,57 ^{**}	6,44 ^{**}	15,57 ^{**}	2,03 ^{**}	13,63 ^{**}	0,48 ^{**}	
AsxP450	4	89,77 ^{**}	17,06 ^{**}	37,43 ^{**}	0,42 ^{ns}	61,10 ^{**}	0,16 ^{ns}	
Resíduo	28	1,49	0,29	2,17	0,17	0,48	0,09	
Media geral		14,78	7,38	43,78	8,93	10,42	2,78	
CV(%)		8,27	7,30	3,36	4,65	6,66	10,28	

significativo. *, **, ***: significativo a 5, 1 e 0,1 %, respectivamente, pelo teste F.

Para o angico-vermelho, na ausência de P, a massa de matéria seca da parte aérea reduziu linearmente com o aumento das doses de As. Já na presença de P, a massa de matéria seca da parte aérea foi similar para as doses até 400 mg dm⁻³, reduzindo bruscamente na dose de 800 mg dm⁻³ (Tabela 3). Para o ingá, a massa de matéria seca de parte aérea apresentou pequena redução com o aumento das doses de As, tanto na presença quanto na ausência de P (Tabela 4). Estes resultados

indicam que a espécie ingá apresenta menor resposta à adubação fosfatada para minimizar o efeito tóxico do As, além de ser mais tolerante a presença deste elemento no solo.

O diâmetro de colo das plantas de angico-vermelho decresceu linearmente com aumento das doses de As, para teores de P de 0 e 150 mg dm⁻³. O efeito tóxico do As para esta variável foi minimizado apenas para a maior dose de P, onde houve aumento do diâmetro em função das doses de

As (Tabela 3). Na espécie ingá, as doses de As tiveram pouca influência no diâmetro, decrescendo lentamente com o aumento das doses de As, para doses de 0 e 150 mg dm⁻³ de P. Para a dose de 450 mg dm⁻³ de P, não houve resposta em função das doses de As (Tabela 4).

A dose intermediária de P proporcionou incremento de altura até a dose de 400 mg dm⁻³ de As para a espécie angico-vermelho. Na maior dose de P, este incremento ocorreu apenas até a dose de 100 mg dm⁻³. Por outro lado, na presença de P foi verificado decréscimo linear do incremento de diâmetro com aumento das doses de P (Tabela 3).

Estes resultados indicam indica que o efeito atenuador do P ocorre em faixas limitadas de concentração deste elemento no solo, de forma a propiciar maior crescimento desta espécie apenas em termos de altura.

Para o ingá, tanto o incremento de altura quanto de diâmetro pouco se alterou quanto a presença ou não de P, sendo que o incremento de altura apresentou ligeiro decréscimo com o aumento das doses de As e o incremento de diâmetro apresentou resposta linear negativa apenas para a dose de 150 mg dm⁻³ de P, não havendo efeito das doses de As para as demais doses de P (Tabela 4).

Tabela 3. Respostas de altura de planta, incremento de altura, diâmetro de colo, incremento de diâmetro e matéria seca de parte aérea e raízes em função das doses de arsênio, para diferentes doses de fósforo nas plantas de angico-vermelho.

Teores de fósforo	Teores de arsênio (mg dm ⁻³)						Equação de regressão	R ²
	0	100	200	400	800	\bar{X}		
Altura de planta (cm)								
0	50,67	46,50	46,33	40,32	30,33	42,83**	$\hat{y} = 50,017 - 0,0245^{**}x$	0,98
150	52,33	48,33	45,00	44,63	31,67	44,39**	$\hat{y} = 51,530 - 0,0240x^{**}$	0,96
450	67,00	66,67	45,00	44,33	35,33	51,67**	$\hat{y} = 69,769 - 0,114^{**}x + 0,00009^{**}x^2$	0,93
Incremento de altura (cm)								
0	23,33	19,33	16,00	14,17	4,67	15,50**	$\hat{y} = 22,037 - 0,022^{**}x$	0,97
150	23,00	24,00	23,83	23,67	6,83	20,27**	$\hat{y} = 22,546 + 0,021^{**}x - 0,00005^{**}x^2$	0,99
450	42,50	41,83	20,33	10,67	12,17	25,50**	$\hat{y} = 46,154 - 0,132^{**}x + 0,00001^{**}x^2$	0,91
Diâmetro de colo (mm)								
0	6,02	5,69	5,66	5,30	5,17	5,59*	$\hat{y} = 5,867 - 0,001^{**}x$	0,85
150	6,57	6,55	6,60	6,33	5,78	6,37*	$\hat{y} = 6,680 - 0,00105x^{**}$	0,92
450	7,17	6,26	6,05	6,22	6,22	6,38**	$\hat{y} = 7,136 - 0,111^{**}\sqrt{x} + 0,003^{**}x$	0,95
Incremento de diâmetro (cm)								
0	2,15	2,74	2,32	2,21	1,62	2,21**	$\hat{y} = 2,350 + 0,0007^{**}x - 2E10^{-6}x^2$	0,73
150	2,65	2,77	2,74	2,55	1,99	2,54**	$\hat{y} = 2,819 - 0,0009^{**}x$	0,85

450	3,25	3,49	3,33	2,19	1,78	2,81**	$\hat{y}=3,479-0,002^{**}x$	0,84
Matéria seca da parte aérea (g)								
0	11,26	9,48	8,75	8,82	3,82	8,43**	$\hat{y}=10,943-0,0084^{**}x$	0,92
150	11,77	10,67	10,71	10,98	4,64	9,75**	$\hat{y}= 11,118+0,0037^{ns}x-2E10^{-5}x^2$	0,95
450	12,32	10,95	11,08	9,97	4,49	9,76**	$\hat{y}=11,897-0,020x^{ns}+0,00001^{**}x^2$	0,98
Matéria seca de raízes (g)								
0	15,09	13,72	17,70	10,06	7,95	12,90**	$\hat{y}=15,197-0,016^{**}x+0,000008^{**}x^2$	0,99
150	17,33	13,65	11,35	11,20	6,50	12,01**	$\hat{y}=16,333-0,020^{**}x+0,00001^{**}x^2$	0,92
450	16,72	11,48	12,85	12,52	6,77	12,07**	$\hat{y}=16,6698-0,209^{**}\sqrt{x}-0,0032^{***}x$	0,81

*, **: significativo a 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste t.

Tabela 4. Respostas de altura de planta, incremento de altura, diâmetro de colo, incremento de diâmetro e matéria seca de parte aérea e raiz em função das doses de arsênio, para diferentes doses de fósforo nas plantas de ingá

Teores de fósforo	Teores de arsênio (mg dm ⁻³)						Equação de regressão	R ²
	0	100	200	400	800	\bar{X}		
Altura de planta (cm)								
0	43,00	46,00	45,00	43,33	39,00	43,27**	$\hat{y} = 43,131+0,448^{**}\sqrt{x} -0,021^{**}x$	0,99
150	46,67	46,11	46,00	45,00	41,00	44,96**	$\hat{y} = 47,033-0,007^{**}x$	0,94
450	47,33	46,12	43,00	39,67	39,66	43,16**	$\hat{y} = 47,856-0,029^{**}x+0,00002^{**}x^2$	0,98
Incremento de altura (cm)								
0	7,00	16,00	12,17	8,33	5,33	9,77**	$\hat{y} = 7,917+0,833^{**}\sqrt{x} -0,034^{**}x$	0,74
150	12,50	9,77	9,07	7,80	6,97	9,22**	$\hat{y} = 12,505-0,309^{**}\sqrt{x} +0,004^{**}x$	0,99
450	16,83	16,33	12,65	9,00	6,50	12,26**	$\hat{y} = 17,594-0,027^{**}x +0,00002^{**}x$	0,97
Diâmetro de colo (mm)								
0	8,85	9,05	9,16	8,97	8,35	8,88*	$\hat{y} = 8,810+0,088^{**}\sqrt{x} -0,0037^{*}x$	0,76
150	9,06	8,91	9,12	8,56	7,14	8,56**	$\hat{y} = 9,040+0,0003^{ns}x-0,000003^{*}x^2$	0,92
450	9,91	9,20	9,02	9,04	9,06	9,25 ^{ns}	$\hat{y} = \bar{X}$	
Incremento de diâmetro (cm)								
0	2,92	2,85	2,67	2,68	2,63	2,75 ^{ns}	$\hat{y} = \bar{X}$	
150	3,35	3,36	3,29	2,73	2,50	3,05**	$\hat{y} = 3,408-0,0012^{**}x$	0,90
450	2,94	3,04	3,59	3,08	3,09	3,15 ^{ns}	$\hat{y} = \bar{X}$	
Matéria seca da parte aérea (g)								
0	18,67	16,33	15,33	14,33	14,32	15,80**	$\hat{y} = 18,297-0,0167^{**}x+0,00002^{**}x^2$	0,96
150	22,67	14,00	13,35	13,33	9,00	14,47**	$\hat{y} = 22,145-0,789^{**}\sqrt{x}+0,013^{**}x$	0,93

450	22,68	14,67	13,66	12,00	7,68	14,14**	$\hat{y} = 22,322 - 0,737^{**} \sqrt{x} + 0,008^{**} x$	0,98
Matéria seca de raízes (g)								
0	11,64	8,23	8,06	7,92	6,74	8,52**	$\hat{y} = 11,463 - 0,325^{**} \sqrt{x} + 0,0059^{**} x^2$	0,94
150	8,50	8,26	7,42	7,34	4,78	7,26**	$\hat{y} = 8,599 - 0,0045^{**} x$	0,95
450	9,86	7,35	6,26	4,62	3,81	6,38	$\hat{y} = 9,530 - 0,019^{**} x + 0,00002^{**} x$	0,98

*, **: significativo a 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste t.

A redução na produção de matéria seca tanto na parte aérea quanto radicular é resultante da fitotoxicidade do As, já que sua disponibilidade pode ser aumentada com baixos níveis de P no solo (Wang et al., 2002). No entanto, as plantas de angico-vermelho apresentaram comportamento diferenciado das plantas de ingá, esta última apresentando incremento na massa de matéria seca com o aumento das doses de P dentro de cada dose de As até a dose de 400 mg dm⁻³. Porém, redução acentuada na massa de matéria seca foi observada tanto na parte aérea quanto de raízes. Essa redução foi na ordem de 66, 60 e 63 % para parte aérea e 47, 63 e 59 % para raízes nas doses de 0; 150 e 450 mg dm⁻³ de P no solo contaminado com 800 mg dm⁻³ de As, respectivamente.

De modo geral, na ausência do As houve resposta positiva quanto ao crescimento das plantas em função das doses de P, com exceção da produção de matéria seca de raízes de ingá que não responderam a adubação fosfatada. Este comportamento possivelmente pode ser resultante da característica da espécie devido a seletividade na absorção do As, já que As e P são competidores pelo mesmo sítio de absorção.

Teores de arsênio nos diferentes compartimentos de folhas jovem, folhas intermediárias, folhas basais, caule e raízes das plantas de ingá e angico

Os maiores teores de As nas plantas de angico-vermelho foram encontrados no caule, na ordem de 74,98 mg kg⁻¹ quando submetida a dose de 800 mg kg⁻¹ na presença de 450 mg kg⁻¹ de P (Tabela 5). Apesar dos maiores teores terem sido encontrados no caule, a concentração de apenas 4,52 mg kg⁻¹ na ausência de P foi suficiente para promover o aparecimento de lesões foliares, aumentando os teores a medida que aumentava as concentrações de P no solo. Concentrações de As entre 0,1 e 5,0 mg kg⁻¹ na matéria seca da parte aérea são consideradas tóxicas para plantas (Wauchope, 1983). No ingá, os maiores teores de As foram encontrados nas raízes, também para as maiores doses de As e P aplicadas no solo (Tabela 6).

Observou-se significativo aumento nos teores de As na matéria seca das raízes com a dose de 150 mg dm⁻³ de P para o angico-vermelho (Tabela 5) e com a dose de 400 mg dm⁻³ para o ingá (Tabela 6), com resposta menos acentuada para esta última espécie. Com exceção das folhas jovens de ingá, foi verificado efeito significativo quanto ao teor de As nos diferentes compartimentos em função das doses de As aplicadas ao solo, sendo que o efeito do P foi diferenciado em cada compartimento das plantas de angico-vermelho e ingá.

Os teores foliares de As foram semelhantes aos teores encontradas nas raízes para o angico-vermelho, e no ingá os teores radiculares foram superiores aos foliares. O acúmulo de arsênio em ambas espécies se dá principalmente nas folhas basais. Os maiores teores de As encontrados nos diferentes compartimentos das plantas, na presença de P, mostram que o fosfato pode contribuir para elevar a disponibilidade de As. No entanto, este efeito depende da concentração de P no solo, que pode tanto aumentar quanto diminuir a absorção de As pela planta.

O As é um elemento que é pouco translocado para a parte aérea, com baixo nível de transferência na cadeia trófica (Berton, 2000). No entanto, a distribuição diferenciada de elementos tóxicos nos compartimentos da planta é, de certo modo, relacionada com a absorção e translocação do elemento como observado em plantas de leucena e sesbania e pode estar diretamente relacionada a

mecanismos de tolerância (Accioly e Siqueira, 2000).

Avaliando os teores de As nos diferentes compartimentos das plantas é possível verificar expressiva translocação de As para a parte aérea, principalmente para a espécie angico-vermelho. Espécies com esta característica podem facilitar o processo de fitoextração do As e consequente entrada nos componentes do ecossistema, tendo-se em vista que o caule (a madeira) tem elevado valor econômico e pode ser utilizado pela indústria para diversos fins. Desta forma, diversos estudos devem ser realizados para conhecer o comportamento do As na presença de P para diferentes espécies vegetais, procurando selecionar espécies com potencial uso para recuperação de áreas contaminadas com As.

Tabela 5. Teores de As nas diferentes partes da planta de angico-vermelho em função das doses de As e P e respectivas funções de ajuste

Teores de fósforo	Teores de arsênio (mg dm ⁻³)						Equações de regressões	R ²
	0	100	200	400	800	\bar{X}		
folhas jovens (mg kg ⁻¹)								
0	0,00	5,32	6,67	7,62	4,14		$\hat{y} = -0,163 + 0,827\sqrt{x} - 0,024x$	0,98
150	0,00	11,01	5,19	4,56	4,80		$\hat{y} = \bar{X}$	
450	0,00	1,57	1,27	0,81	0,66		$\hat{y} = 0,123 + 0,154^{***}\sqrt{x} - 0,005^{ns}x$	0,75
folhas intermediárias (mg kg ⁻¹)								
0	0,00	6,03	6,05	4,72	4,65		$\hat{y} = 0,354 + 0,647^{**}\sqrt{x} - 0,018x^{**}$	0,87
150	0,00	11,96	10,98	8,98	7,60		$\hat{y} = 0,775 + 10244^{**}\sqrt{x} - 0,037x^{**}$	0,84
450	0,00	7,21	3,30	2,00	1,87		$\hat{y} = \bar{X}$	
folhas basais (mg kg ⁻¹)								

0	0,00	8,15	9,19	13,08	24,59		$\hat{y}=2,714+0,027^{**}x$	0,95
150	0,00	11,75	12,19	13,27	16,76		$\hat{y}=0,565+1,139^{**}\sqrt{x}-0,021x^{**}$	0,95
450	0,00	7,93	9,53	12,76	71,44		$\hat{y}=4,161-0,017+0,00012^{**}x$	0,98
caule (mg kg ⁻¹)								
0	0,00	0,00	0,15	0,97	5,04		$\hat{y}=-0,720+0,007^{**}x$	0,90
150	0,00	1,03	1,92	2,80	43,17		$\hat{y}=1,902-0,034^{**}x+0,0001^{**}x^2$	0,99
450	0,00	0,00	0,28	0,71	74,98		$\hat{y}=3,322-0,079^{**}x+0,0002^{**}x^2$	0,99
raízes (mg kg ⁻¹)								
0	0,00	6,45	10,24	12,24	23,18		$\hat{y}=2,612+0,026^{**}x$	0,95
150	0,00	4,78	12,22	16,82	51,45		$\hat{y}=-0,0186+0,063^{**}x$	0,97
450	0,00	2,66	17,92	20,60	26,40		$\hat{y}=-0,899+0,083^{**}x-0,00006^{**}x^2$	0,92

*, **: significativo a 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste t.

Tabela 6. Teores de As nas diferentes partes da planta de ingá em função das doses de As e P e respectivas funções de ajuste

Teores de fósforo	Teores de arsênio (mg dm ⁻³)						Equação de regressão	R ²
	0	100	200	400	800	\bar{X}		
folhas jovens (mg kg ⁻¹)								
0	0,00	2,48	0,00	0,00	0,00	0,50	$\hat{y}=\bar{X}$	
150	0,00	4,38	0,00	0,00	0,00	0,88	$\hat{y}=\bar{X}$	
450	0,00	1,17	0,00	0,00	0,00	0,23	$\hat{y}=\bar{X}$	
folhas intermediárias (mg kg ⁻¹)								
0	0,00	3,53	2,69	2,62	1,67	2,10	$\hat{y}=0,125+0,367^{**}\sqrt{x}-0,011x^{**}$	0,86
150	0,00	4,45	3,28	2,56	2,10	2,48	$\hat{y}=0,344+0,418^{**}\sqrt{x}-0,013x^{**}$	0,75
450	0,00	2,74	3,13	5,64	7,67	3,84	$\hat{y}=0,014+0,002^{**}\sqrt{x}-0,226x^{**}$	0,99
folhas basais (mg kg ⁻¹)								
0	0,00	7,61	4,74	3,40	3,00	3,75	$\hat{y}=0,707+0,639^{**}\sqrt{x}-0,021^{ns}x$	0,61
150	0,00	3,58	3,64	4,22	16,50	5,59	$\hat{y}=-0,106+0,019^{**}x$	0,90
450	0,00	6,30	6,80	7,01	22,91	8,60	$\hat{y}=0,944+0,026^{**}x$	0,90
caule (mg kg ⁻¹)								
0	0,00	0,00	0,00	0,00	4,52	0,90	$\hat{y}=0,208-0,005^{**}x+0,00001^{*}x^2$	0,99
150	0,00	0,00	0,00	0,00	14,71	2,94	$\hat{y}=0,679-0,016^{**}x+0,0004^{**}x^2$	0,99
450	0,00	0,00	0,00	2,34	60,43	12,55	$\hat{y}=2,248-0,057^{**}x+0,00002^{*}x^2$	0,99
raízes (mg kg ⁻¹)								
0	0,00	35,34	47,38	92,83	200,24		$\hat{y}=1,962+0,244^{**}x$	0,99

150	0,00	35,69	46,07	66,39	100,21	$\hat{y}=6,837+0,208^{**}x+0,00011^{*}x^2$	0,97
450	0,00	36,22	67,32	73,66	288,31	$\hat{y}=15,895+0,068^{**}x+0,0003^{**}x^2$	0,97

*, **: significativo a 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste t.

Teores de arsênio em nectários foliares

As plantas de ingá e angico-vermelho podem absorver, transportar e eliminar parte do arsênio através dos nectários foliares, provavelmente, como um mecanismo de defesa dessas espécies a esse metaloide (Figura 2). Os maiores teores de arsênio foram encontrados nos nectários do angico-vermelho (40,50 mg kg⁻¹), enquanto que no ingá o maior teor foi de 3,24 mg kg⁻¹, quando submetido a 100 mg dm⁻³ de arsênio na ausência de fósforo. Ambos valores estão acima do permitido pela legislação para qualidade de mel

para consumo humano, que é de um teor de As não superior a 0,2 mg kg⁻¹ (BRASIL, 2000).

Constatou-se, ainda, que as plantas submetidas as maiores doses de arsênio e fósforo apresentaram menores teores de arsênio no néctar. Isso pode ser explicado pela semelhança entre arsênio e fósforo de modo que plantas com elevada dose de fósforo reduziram os teores de arsênio no néctar, mesmo quando foram submetidas a doses elevadas de arsênio (Tabela 7).

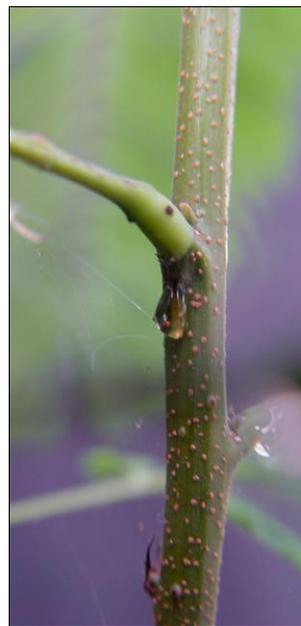


Figura 2. Nectários foliares em ingazeiro e angico-vermelho (Melo, 2005)

Tabela 7. Teores de As em nectários foliares de plantas de ingazeira e angico-vermelho submetidas aos efeitos da interação As x P

Teores de fósforo	Teores de arsênio (mg kg ⁻¹)						Equação de regressão	R ²
	0	100	200	400	800	\bar{X}		
Angico-vermelho								
0	0,00	40,70	20,56	12,26	2,92	15,29**	$\hat{y} = \bar{X} = 2,92$	
150	0,00	16,99	28,83	8,81	0,37	11,00**	$\hat{y} = 0,5357 + 2,911^{**} \sqrt{x} - 0,106^{**} x$	0,77
450	0,00	5,83	3,91	2,11	0,09	2,39**	$\hat{y} = 0,4801 + 0,584^{**} \sqrt{x} - 0,0218^{**} x$	0,79
ingá								
0	0,00	3,24	2,05	1,98	0,91	1,64**	$\hat{y} = 0,214 + 0,318^{**} \sqrt{x} - 0,318^{**} x$	0,78
150	0,00	1,47	1,63	1,59	2,59	1,46**	$\hat{y} = 0,100 + 0,1230^{**} \sqrt{x} - 0,0014^{**} x$	0,92
450	0,00	1,24	1,03	1,15	0,14	0,71**	$\hat{y} = 0,014 + 0,167^{**} \sqrt{x} - 0,006^{**} x$	0,95

*, **: significativo a 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste t.

Conclusões

As plantas de ingá apresentaram tolerância ao As, crescendo em solo contendo até 400 mg dm⁻³ de As e na presença de P.

A maior capacidade de translocação de As das raízes para a parte aérea foi observada no angico-vermelho, sugerindo que está espécie possui potencial de uso em programas de fitoextração.

O efeito da aplicação de P na redução da toxicidade do As às plantas foi constatado, no entanto, este efeito depende da dose de P e da espécie.

As plantas de angico-vermelho apresentam maior capacidade de liberar arsênio através dos nectários foliares. A aplicação de doses elevadas de fósforo contribui para reduzir os teores de arsênio no néctar foliar.

Bibliografia

Accioly, A.M.A., Siqueira, J.O., 2000. Contaminação química e biorremediação do solo. *Tópicos em Ciência do Solo* 1, 299-351.

Adriano, D.C., 2001. Trace Elements in the Terrestrial Environment: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals, 2 ed. Springer, New York.

Alvarez V., H.V., 1974. Equilíbrio de formas disponíveis de fósforo e enxofre em dois Latossolos de Minas Gerais. Dissertação (Mestrado). Viçosa, UFV.

Antelo, J., Arce, F., Fiol, S., 2015. Arsenate and phosphate adsorption on ferrihydrite nanoparticles. Synergetic interaction with calcium ions. *Chemical Geology* 410, 53-62.

Berton, R.S., 2000. Riscos de contaminação do agroecossistema com metais pesados, in: Bettiol, W., Camargo, O.A. (Eds). Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, p.259-268.

BRASIL, 2000. Instrução normativa nº 11, de 20 de outubro.

Campos, M.L., Guilherme, L.R.G., Antunes, A.S., Borges, K.S.C., 2013. Teor de arsênio e

- adsorção competitiva arsênio/fosfato e arsênio/sulfato em solos de Minas Gerais, Brasil. *Ciência Rural* 46, 985-991.
- Chen, M., Ma, L.Q., Hoogeweg, C.G., Harris, W.G., 2001. Arsenic background concentrations in Florida, U.S.A. surface soils: Determination and interpretation. *Environmental Forensics* 2, 117-126.
- COPAM, 2011. Deliberação normativa N° 166, de 29 de junho.
- Favas, P.J.C., Pratas, J., 2015. Heavy metals and arsenic uptake by wild vegetation in old mining areas of Portugal: Phytoremediation perspectives. *Journal of Biotechnology* 208, S58.
- Felipe, R.T.A., Oliveira, J.A., Leão, G.A., 2009. Potencial de *Cajanus cajan* e *Crotalaria spectabilis* para fitorremediação: absorção de arsênio e respostas antioxidativas. *Revista Árvore* 33, 245-254.
- Jacobs, L.W., Keeney, D.R., 1970. Arsenic-phosphorous interactions on corn. *Communication in Soil Science and Plant Analysis* 1, 85-93.
- Matschullat, J. Arsenic in the geosphere-A review. *Science of the Total Environment* 249, 297-312.
- Meharg, A.A., Hartley-Whitaker, J., 2002. Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species. *New Phytologist* 154, 29-43.
- Smith, E., Naidu, R., Alston, A.M., 1998. Arsenic in the soil environment: a review. *Advances in Agronomy* 64, 149-195.
- Sneller, F.E.C., Van Heerwaarden, L.M., Kraaijeveld-Smit, F.J.L., Ten Bookum, W.M., Koevoets, P.L.M., Schat, H., Verkleij, J.A.C., 1999. Toxicity of arsenate in *Silene vulgaris*, accumulation and degradation of arsenate-induced phytochelatins. *New Phytologist* 144, 223-232.
- Tedesco, M.J., Gianello, C., Bissani, C.A., Bohnen, H., Volkweiss, S.J., 1995. *Análise de solo, plantas e outros materiais*, 2 ed. UFRGS, Porto Alegre.
- Tu, C., Ma, L.Q., 2003. Effects of arsenate and phosphate on their accumulation by an arsenic-hyperaccumulator *Pteris vittata* L. *Plant and Soil* 249, 373-382.
- Wang, J., Zhao, F.J., Meharg, A.A., Raab, A., Feldmann, J., Macgrath, S.P., 2002. Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in *Pteris vittata*. Uptake kinetics, interactions with phosphate and arsenic speciation. *Plant Physiology* 130, 1552-1561.
- Wauchope, R.D., 1983. Uptake, translocation and phytotoxicity of arsenic in plants, in: Lederer, W.H., Fensterheim, R.J. (Eds.), *Arsenic: Industrial, Biomedical, Environmental Perspectives*. Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 348-375.