

Fitotoxicidade do mercúrio sobre a qualidade fisiológica em sementes de saboneteira (*Sapindus saponaria* L.) submetidas à escarificação mecânica

Bruno Oliveira Lafetá^{1*}, Lucimeiri Alves Nascimento², Carlos Henrique Souto Azevedo³, Tamires Mousslech Andrade Penido⁴, Luiz Felipe Ramalho de Oliveira⁵

Resumo

A contaminação de solos por mercúrio é um problema ambiental grave, com potencial de biomagnificação em cadeias alimentares e danos à saúde humana. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito de diferentes concentrações de HgO na germinação e desenvolvimento de plântulas de *Sapindus saponaria* submetidas a escarificação mecânica. O experimento foi instalado em DIC com quatro repetições de 25 sementes, no esquema fatorial 4 x 2, sendo estudado o efeito de quatro concentrações de HgO em vermiculita (C1 – 0,000 g/cm³; C2 – 0,025 g/cm³; C3 – 0,050 g/cm³ e C4 – 0,075 g/cm³) e de dois pré-tratamentos (P1 – Testemunha: sementes com tegumento intacto e P2 – escarificação mecânica do tegumento em esmeril elétrico). Avaliaram-se atributos relacionados à germinação e desenvolvimento de plântulas. Realizaram-se teste F, análise de regressão e teste *t* pareado, todos a 5,0 % de significância estatística. A escarificação mecânica do tegumento com esmeril elétrico favoreceu a embebição das sementes (100,0 %), germinação (85,25 %) e emissões de raízes laterais (70,0 %) e de parte aérea (76,25 %). A presença de mercúrio na vermiculita prejudicou o desenvolvimento das plântulas. Conclui-se que a escarificação mecânica do tegumento com esmeril elétrico pode ser indicado para superar a dormência das sementes de *S. saponaria*. Esta espécie tolera pequenas concentrações de HgO (0,0045 g/cm³) sem causar maiores danos ao seu crescimento e acúmulo de massa verde.

Palavras-chave: Desenvolvimento de plântulas. Germinação. Óxido de mercúrio II.

Phytotoxicity of mercury and mechanical scarification in *Sapindus saponaria* L. propagation

Abstract

Soil contamination by mercury is a serious environmental problem, with potential for food chain biomagnification and damage to human health. This study aimed to evaluate the effect of different concentrations of HgO on germination and seedling development of *Sapindus saponaria* submitted to mechanical scarification. The experiment was established in completely randomized design with four repetitions of 25 seeds, in 4 x 2 factorial arrangement, being studied the effect of four concentrations of HgO in vermiculite (C1 – 0.000 g/cm³; C2 – 0.025 g/cm³; C3 – 0.050 g/cm³ e C4 – 0.075 g/cm³) and two pre-treatments (P1 – Control: seeds with intact integument and P2 – mechanical scarification with electric emery). Attributes related to germination and seedling development were evaluated. F-test, regression analysis and paired t-test were performed, all of the 5.0 % statistical significance. Mechanical scarification with electric emery favored seed imbibition (100.0%), germination (85.25 %) and emissions of lateral roots (70.0 %) and shoot (76.25 %). The presence of mercury in vermiculite impaired seedling development. It was concluded

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais. São João Evangelista, MG. Brasil.
<http://orcid.org/0000-0003-2913-6617>

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais. São João Evangelista, MG. Brasil.
<https://orcid.org/0000-0002-5154-9023>

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais. São João Evangelista, MG. Brasil.
<https://orcid.org/0000-0002-2031-4280>

⁴Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Diamantina, MG. Brasil.
<https://orcid.org/0000-0001-7764-8532>

⁵Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Diamantina, MG. Brasil.
<http://orcid.org/0000-0003-2579-9341>

*Autor para correspondência: bruno.lafeta@ifmg.edu.br

that mechanical scarification with electric emery can be indicated to overcome seed dormancy of *S. saponaria*. This species tolerate low concentrations of HgO (0.0045 g/cm³) without causing further damage to its growth and accumulation of green mass.

Keywords: Seedling development. Germination. Mercury II oxide.

Introdução

A contaminação de solos por metais pesados é um problema ambiental grave que deve ser tratado com cautela pela sociedade. Metais podem ser absorvidos por vegetais e ingressar na cadeia alimentar, prejudicando a saúde humana (Kehrig et al., 2011).

O mercúrio (Hg) é um metal não essencial para as plantas, geralmente tóxico mesmo em baixas concentrações (White e Brown, 2010). Possui número atômico 80, densidade de 13,58 g/cm³ na forma líquida e pode ser comercializado como óxido de mercúrio II (HgO), que possui massa molar de 216,6 g/mol e aspecto físico de pó fino e coloração laranja (Damas et al., 2014). As principais fontes poluidoras de mercúrio são provenientes dos garimpos de ouro e fontes difusas como a deposição de resíduos sólidos em aterros sanitários, queima de combustíveis fósseis e produção de aço utilizando sucata como matéria prima (Micaroni et al., 2000).

O metal pesado pode inibir a respiração e causar danos ao sistema fotossintético vegetal (Milner e Kochian, 2008; Voicu e Zwiazek, 2010). A primeira barreira de íons metálicos via simplasto é a membrana plasmática de células radiculares. Concentrações tóxicas de metal estimulam a oxidação lipídica da membrana e desequilíbrio iônico no citoplasma (Kenderesová et al., 2012). Normalmente, plantas terrestres possuem uma capacidade limitada de tolerar solos com excesso de metais pesados, armazenando íons na parede celular das raízes e vacúolos (Milner e Kochian, 2008; Conn e Gilliam, 2010). A compartimentação do metal dentro das células é fundamental para manter baixa sua concentração no citoplasma (Kenderesová et al., 2012).

A regulação do influxo e efluxo celular de metal é responsável pela sua translocação para o tecido ou órgão onde será armazenado e, em alguns casos, inativado (Kenderesová et al., 2012). Segundo Conn e Gilliam (2010), a sensibilidade de plantas a esses metais pode ser influenciada por fatores moleculares (aminoácidos, ferritinas e ácidos orgânicos) e fisiológicos (estresse, absorção de metais através da parede celular e/ou de ligação a exsudatos extracelulares).

Espécies autóctones de rápido crescimento e acumuladoras de metais pesados minimizam custos com fitorremediação e preservam a atividade biológica e estrutural de solos (Cicatelli et al., 2010). Várias espécies evoluíram e se adaptaram a solos metálicos e, exemplos podem ser observados nas famílias Asteraceae, Brassicaceae, Caryophyllaceae, Fabaceae, Poaceae, Salicaceae,

Sapindaceae e Violaceae (Milner e Kochian, 2008; Marmiroli et al., 2011; Noriega-Luna et al., 2016).

Sapindus saponaria L. (Sapindaceae), conhecida popularmente como saboneteira, saboneteiro ou saboeiro, é uma espécie de porte arbóreo, heliófita e nativa de áreas úmidas do Brasil (Albiero et al., 2001; Grisi et al., 2013; Rashed et al., 2013). Pertence ao grupo ecológico das secundárias tardias e é amplamente empregada em planos para a revegetação de áreas degradadas e arborização de centros urbanos (Silva et al., 2016).

Sementes de *S. saponaria* apresentam dormência física causada pela impermeabilidade do tegumento à penetração de água. Desta forma, mesmo com o embrião totalmente formado, não ocorre a embebição de água pelo material propagativo (Cook et al., 2008; Turner et al., 2009; Oliveira et al., 2012). Essa dormência pode ser superada com a escarificação mecânica do tegumento e a germinação, favorecida por temperaturas entre 25 e 35°C (van Klinken; Flack, 2005).

A dormência é uma estratégia evolutiva que distribui a germinação ao longo do tempo, estabelecendo plantas em condições ambientais favoráveis para seu crescimento (Copete et al., 2011; Toorop et al., 2012; van Klinken et al., 2008). Entretanto, pode causar atrasos e desuniformidade na germinação (Wagmann et al., 2012).

Informações sobre a propagação de espécies nativas em ambientes perturbados com a presença de metais pesados são necessárias para o desenvolvimento de técnicas de fitorremediação e prevenção de áreas sujeitas à contaminação. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes concentrações de HgO na germinação e desenvolvimento de plântulas de *Sapindus saponaria* submetidas a escarificação mecânica.

Material e métodos

Foram selecionadas árvores de *S. saponaria* para a coleta de frutos em fragmentos de Mata Atlântica, sob as coordenadas de 18°32'44,99" de latitude Sul e 42°45'17,64" de longitude Oeste (Datum Sirgas 2000), em área do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista (IFMG/SJE). O clima da região é o temperado chuvoso-mesotérmico, classificado como Cwa pelo sistema de Köppen (com inverno seco e verão chuvoso). As médias anuais de precipitação e temperatura são de 1377 mm e 20,2°C, respectivamente (Climate-data.org, 2019).

As árvores selecionadas apresentavam altura total de 5 a 7 m, diâmetro a 1,30 m do solo superior a 20 cm e nenhum sinal aparente de injúrias ocasionadas pelo ataque de insetos ou doenças. A coleta dos frutos foi realizada diretamente na copa com auxílio de podão, restringindo-se àqueles de coloração marrom. Posteriormente, foram acondicionados em sacos de papel Kraft e conduzidos ao Laboratório de Sementes do IFMG/SJE para triagem. Essa foi realizada manualmente, isolando as sementes dos frutos e eliminando o material que possuía alguma injúria, atrofia ou ataque por insetos a fim de se obter uma melhor qualidade e pureza física dos lotes.

O teor de água das sementes foi determinado pelo método da estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24 h, com quatro repetições de 25 unidades.

As sementes após a triagem foram desinfestadas com hipoclorito de sódio (NaClO), com 2,0 % de cloro ativo, a 5,0 % (v/v) durante três min, depois lavadas com água destilada e colocadas para secar durante dez min sobre papel toalha. Optou-se pelo NaClO por se tratar de um composto químico contra proliferação bacteriana.

O trabalho foi conduzido em câmara de germinação do tipo *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) com fotoperíodo contínuo (24 h) e temperatura de 31°C , procedimento de rotina usado para espécies florestais pelo Laboratório de Sementes do IFMG/SJE. O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado com quatro repetições, no esquema fatorial 4×2 , sendo estudado o efeito de quatro concentrações de Óxido de Mercúrio II (HgO) em substrato (C1 – $0,000 \text{ g/cm}^3$; C2 – $0,025 \text{ g/cm}^3$; C3 – $0,050 \text{ g/cm}^3$ e C4 – $0,075 \text{ g/cm}^3$) e dois pré-tratamentos (P1 – Testemunha: sementes com tegumento intacto e P2 – escarificação mecânica do tegumento em esmeril elétrico: as sementes foram friccionadas em esmeril elétrico com auxílio de um alicate na região oposta ao eixo-embrionário até o desgaste do tegumento, evitando, contudo danificar o embrião. A unidade experimental foi constituída por 25 sementes. Esta quantidade foi definida conforme a capacidade da caixa gerbox (transparente, com dimensões de $11 \times 11 \times 3,5\text{cm}$), recipiente empregado para a semeadura de *S. saponaria*. A caixa gerbox foi escolhida com a finalidade de reduzir riscos com a saúde do avaliador e contaminação ambiental por HgO.

Cada caixa gerbox foi previamente desinfestada com álcool etílico 70 % (v/v) e preenchida com 200 cm^3 de vermiculita expandida superfina. A mistura da vermiculita com o HgO foi realizada na caixa gerbox com auxílio de um bastão de vidro. A semeadura foi feita sobre a superfície do substrato umedecido. As caixas gerboxes foram fechadas com tampa própria e distribuídas aleatoriamente na BOD, totalizando 32 unidades experimentais.

As avaliações foram realizadas diariamente até a contagem final e estabilização de todos os atributos estudados (trigésimo dia), registrando número de sementes

embebidas (Emb), germinação (G, protrusão de radícula superior a 1,0 cm) e emissões de parte aérea (EPA) e de raízes laterais (ERL). As sementes não embebidas foram consideradas duras, pois mantiveram o aspecto de recém semeadas. Calcularam-se os índices de velocidade da embebição (IVEmb) e da germinação (IVG) conforme a metodologia proposta por Maguire (1962).

Após a contagem final, tomaram-se das plântulas normais os comprimentos da raiz principal (CR) e da parte aérea (CPA) com um paquímetro digital de precisão $1/10 \text{ mm}$ e, depois, obtida a relação CPA/CR. A massa verde de cada um desses componentes foi realizada com balança digital de $0,0001 \text{ g}$ de precisão. Calculou-se a massa verde total (MVT) pela soma das massas do sistema radicular (MVR) e da parte aérea (MVPA). Considerou-se como plântula normal aquelas que apresentaram desenvolvimento radicular superior a 1,0 cm (Brasil, 2009).

Todos os dados expressos em porcentagem foram transformados em $\text{arc seno} \sqrt{x/100}$ e o restante em \sqrt{x} , a fim de atender aos critérios de normalidade segundo Lilliefors e homogeneidade por Cochran. Realizaram-se teste F, regressão quadrática e teste *t* pareado, todos a 5 % de significância estatística. Na análise de regressão, foi usado o método dos mínimos quadrados ordinários (MQO). As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do software R versão 3.5.2 (R Core Team, 2018).

Resultados e discussão

O teor de água das sementes de *S. saponaria* foi de $12,72 \pm 6,1431 \%$. O efeito estatístico de pré-tratamento foi observado em todos os atributos avaliados ($p \leq 0,05$), exceto aqueles obtidos após a contagem final, realizada aos 30 dias (Tabela 1). Estes apresentaram significância em nível de concentrações, exceto o comprimento de parte aérea, cuja média foi de $20,66 \pm 6,1470 \text{ mm}$. As concentrações de HgO resultaram em crescimento diferenciado das plântulas de saboneteira. Em geral, os coeficientes de variação foram baixos e evidenciaram a precisão experimental.

A dormência tegumentar das sementes de *S. saponaria* foi comprovada face à dificuldade de embebição das sementes em água e, conseqüentemente, menor germinação no tratamento testemunha (Tabela 2). Foi necessária a escarificação do tegumento com esmeril elétrico para favorecer a entrada de água e trocas gasosas entre ambiente e embrião; 100,0 % das sementes escarificadas tiveram embebição (IVEmb de 15,54) e 85,25 % germinaram (IVG de 2,07). Essa impermeabilidade pode ser decorrente de um conjunto de células parenquimáticas dispostas em paliçada e de uma camada de cutícula, que protegem o embrião (Freitas et al., 2013). Corroborando com Albiero et al. (2001), que confirmaram a existência de várias camadas no tegumento das sementes de *S. saponaria* que poderiam limitar a absorção de água.

Tabela 1 – Resumo da análise de variância, com os dados transformados, dos atributos avaliados até e após contagem final (30 dias) em sementes de *S. saponaria*

F.V.	----- Q.M. -----					
	Emb	G	EPA	ERL	IVEmb	IVG
Concentrações (c)	25,89ns	24,19ns	36,44ns	49,12ns	0,15ns	0,02ns
Pré-tratamentos (p)	12504,56*	4823,78*	3068,99*	2047,05*	3,33*	0,89*
c x p	25,89ns	75,37ns	268,22ns	226,78ns	0,03ns	0,04ns
Resíduo	22,14	59,33	268,80	302,78	0,06	0,04
CV exp	6,70	13,72	31,71	36,35	6,67	16,95
	CR	CPA	CPA/CR	MVR	MVPA	MVT
Concentrações (c)	63,63*	0,62 ns	0,47*	0,04*	0,02*	0,01*
Pré-tratamentos (p)	0,21ns	0,08ns	0,00ns	0,00ns	0,01ns	0,00ns
c x p	0,12ns	0,45ns	0,01ns	0,00ns	0,00ns	0,00ns
Resíduo	0,33	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00
CV exp	9,47	11,07	6,96	11,92	23,41	3,10

*($p \leq 0,05$). ns($p > 0,05$). Os graus de liberdade foram 3, 1, 3 e 24 para concentrações, pré-tratamentos, interação e resíduo, respectivamente. Emb = Embebidas. G = Germinação. EPA = Emissão de parte aérea. ERL = Emissão de raízes laterais. IVEmb = Índice de velocidade da embebição. IVG = Índice de velocidade da germinação. CR = Comprimento da raiz principal. CPA = Comprimento da parte aérea. MVR = Massa verde do sistema radicular. MVPA = Massa verde da parte aérea. MVT = Massa verde total.

Tabela 2 – Médias dos atributos avaliados até contagem final (30 dias) em sementes de *S. saponaria*

Pré-tratamentos	Emb	G	ERL	EPA	IVEmb	IVG
	----- % -----					
P1	59,25 b	48,00 b	41,25 b	44,75 b	10,91 b	1,19 b
P2	100,00 a	85,25 a	70,00 a	76,25 a	15,54 a	2,07 a

Médias seguidas pela mesma letra não se diferenciam pelo teste F ($p > 0,05$). Emb = Embebidas. G = Germinação. ER = Emissão de raízes. EPA = Emissão de parte aérea. IVEmb = Índice de velocidade da embebição. IVG = Índice de velocidade da germinação. P1 = Testemunha: sementes com tegumento intacto. P2 = Escarificação mecânica com esmeril elétrico.

A dormência tegumentar das sementes de *S. saponaria* foi comprovada face à dificuldade de embebição das sementes em água e, conseqüentemente, menor germinação no tratamento testemunha (Tabela 2). Foi necessária a escarificação do tegumento com esmeril elétrico para favorecer a entrada de água e trocas gasosas entre ambiente e embrião; 100,0 % das sementes escarificadas tiveram embebição (IVEmb de 15,54) e 85,25 % germinaram (IVG de 2,07). Essa impermeabilidade pode ser decorrente de um conjunto de células parenquimáticas dispostas em paliçada e de uma camada de cutícula, que protegem o embrião (Freitas et al., 2013). Corroborando com Albiero et al. (2001), que confirmaram a existência de várias camadas no tegumento das sementes de *S. saponaria* que poderiam limitar a absorção de água.

A embebição tardia do tratamento testemunha provocou desuniformidade na sua germinação. A embebição das sementes escarificadas iniciou-se no primeiro dia de contagem, seguida da germinação (quinto dia) e emissões de parte aérea (oitavo dia) e de raízes laterais (nono dia). Mais emissões de raízes laterais (70,00 %) e

de parte aérea (76,25 %) foram observadas ao escarificar o tegumento das sementes. A frequência de plântulas foi maior nesse tratamento pré-germinativo, demonstrando potencial de estabelecimento no substrato. Assim, espera-se que a semeadura a lanço com sementes escarificadas de *S. saponaria* tenha mais sucesso na recomposição florestal que o uso de sementes com tegumento intacto.

A presença do mercúrio na vermiculita não afetou a embebição e germinação de *S. saponaria* (Tabela 1). A absorção de HgO pela semente pode ter sido limitada em virtude da baixa solubilidade em água (de 0,052 g.L⁻¹ a 25°C) e alta densidade (de 11,1 g/cm³ a 20°C) (Silva e Machado, 2008; Merck Millipore, 2019). É provável que solos contaminados por HgO possam manter bancos de sementes viáveis. Mais pesquisas sobre a avaliação do banco de sementes e plântulas em ambientes contaminados por metais pesados são recomendadas para melhor compreensão da interação entre contaminante e vegetal.

Os parâmetros das equações geradas para estimar os atributos avaliados após a contagem final apre-

sentaram significância estatística ($p \leq 0,05$) (Tabela 3). O comportamento quadrático foi observado em todos os modelos ajustados. Os coeficientes de determinação

ajustados foram elevados (superior a 0,80), exceto para os atributos que envolveram a massa verde. Os valores estimados pelas equações foram semelhantes aos observados conforme teste t ($p > 0,05$).

Tabela 3 – Estatísticas dos ajustes realizados para a estimação dos atributos avaliados após contagem final (30 dias) em plântulas de *S. saponaria* em função de diferentes concentrações de HgO

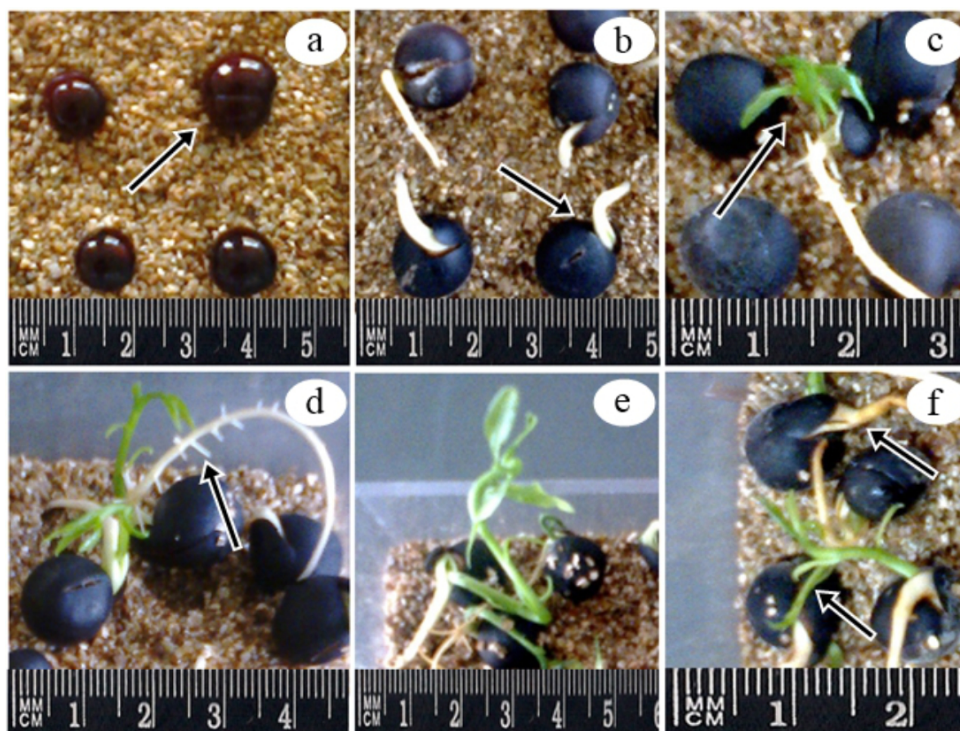
Atributos	CR	H/DC	MVR	MVPA	MVT
\bar{R}^2	0,86	0,82	0,74	0,20	0,20
Erro padrão	14,68	0,14	0,02	0,03	0,10
Teste t (p)	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05
β_0	100,8346*	0,2787*	0,1429*	0,0874*	1,5529*
β_1	-3623,5574*	29,2443*	-3,5865*	-1,9624*	-6,4496*
β_2	34850,9204*	-275,3404*	32,9591*	20,2160*	72,7029*

* ($p \leq 0,05$). " $y = \beta_0 + \beta_1 C + \beta_2 C^2$ ", em que "C" foi a concentração de HgO em g/cm³ de vermiculita. CR = Comprimento da raiz principal. MVR = Massa verde do sistema radicular. MVPA = Massa verde da parte aérea. MVT = Massa verde total.

A presença de mercúrio na vermiculita prejudicou o desenvolvimento das plântulas de *S. saponaria* (Figuras 1 e 2). Realizando a primeira derivada e igualando a zero as equações geradas, foram obtidos os pontos mínimos de comprimento da raiz principal (10,40 mm) e das massas verdes do sistema radicular (0,05 g), da parte aérea (0,04 g) e total (1,06 g) re-

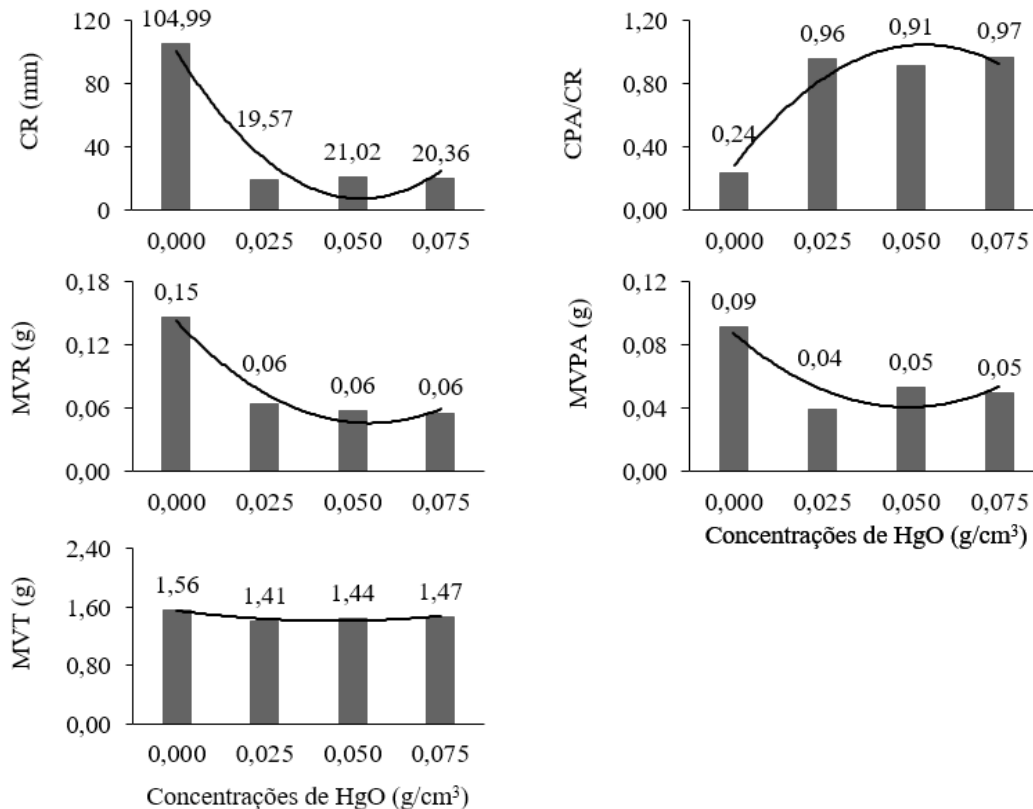
ferentes às concentrações de 0,0520 g/cm³, 0,0544 g/cm³, 0,0485 g/cm³ e 0,0444 g/cm³ de HgO na vermiculita, respectivamente. O ponto máximo da relação CPA/CR (1,06) foi na concentração de 0,0531 g/cm³ de HgO na vermiculita. Portanto, as concentrações mais tóxicas de HgO variaram entre 0,4444 e 0,5444 g/cm³ de HgO na vermiculita.

Figura 1 – Etapas desde a embebição da semente até o desenvolvimento da plântula de *S. saponaria*



a – embebição após 1 dia; b – germinação (protrusão de radícula) após 5 dias; c – emissão de parte aérea após 8 dias; d – emissão de raízes laterais após 9 dias; e – plântula sadia após 30 dias e; f – plântula com sintomas de fitotoxidez de HgO (parte aérea tenra e raízes escuras e atrofiadas) após 30 dias.

Figura 2 – Atributos avaliados, após contagem final (30 dias), em plântulas de *S. saponaria* em função de diferentes concentrações de HgO



CR = Comprimento da raiz principal. MVR = Massa verde do sistema radicular. MVPA = Massa verde da parte aérea. MVT = Massa verde total. CPA = Comprimento da parte aérea.

O primeiro sintoma visível foi o escurecimento e atrofia das raízes à medida que concentrou o HgO (Figura 1e). De acordo com Oliveira et al. (2001), estes sintomas podem ser resultados de alguma alteração no metabolismo vegetal ou mesmo da acumulação de metal pesado nas raízes. O mercúrio pode causar estresse hídrico no vegetal, reagindo com sulfidrilas livres dentro das aquaporinas, diminuindo sua permeabilidade osmótica em células radiculares (Voicu et al., 2008).

O HgO prejudicou o crescimento da raiz principal e acúmulo de massa verde no sistema radicular e de parte aérea vegetal (Figura 2). Concentrações elevadas de mercúrio podem inibir reações metabólicas essenciais para o crescimento vegetal (Voicu et al., 2008). Segundo Boening (2000), o mercúrio pode se acumular nas raízes e limitar a absorção e o transporte de nutrientes e água nas plantas. As concentrações estudadas do metal pesado proporcionaram maior relação entre os comprimentos de parte aérea e de raiz (próximo a 1:1) que a testemunha. Este fenômeno ocorreu devido a formação de raízes atrofiadas naqueles tratamentos com aplicação de HgO, comprometendo, também, o acúmulo de massa verde na parte aérea da plântula.

Também, observou-se amarelecimento das folhas nos tratamentos em que o HgO foi misturado à vermiculita. O estresse fisiológico de origem hídrica induz a

biossíntese do etileno em vegetais (Taiz e Zeiger, 2013), o que justificaria a clorose foliar observada (Goren e Siegel, 1976). O comprimento de parte aérea não foi influenciado pelas concentrações de HgO. Como já esperado, verificou-se fototropismo positivo nas plântulas de *S. saponaria*, que cresceram em direção à luz a fim de manter o equilíbrio fotossintético. Isto se deve, provavelmente, a um transporte de água alternativo às aquaporinas sensíveis ao Hg²⁺. Segundo Voicu e Zwiazek (2010), o bloqueio desses canais sugere a utilização de uma rota apoplástica para o transporte de água em folhas de *Populus tremuloides* Michx. Salienta-se, ainda, que essa rota é influenciada pelo número e atividade das aquaporinas (Neumann, 2008).

A massa verde da parte aérea decresceu com a concentração de HgO na vermiculita, gerando caules tenros e frágeis (Figuras 1e e 2). O crescimento em espessura do caule e nas raízes de espécies lenhosas é regulado pela atividade do meristema lateral, atuando na formação de tecidos de revestimento e de sistemas vasculares secundários (Appezato-da-Glória; Carmello-Guerreiro, 2006). Deste modo, o crescimento secundário das plântulas de *S. saponaria* pode ter sido limitado pelo bloqueio das aquaporinas com o mercúrio, dando origem a caules pouco vigorosos. Outra hipótese que deve ser considerada é a de que o mercúrio possa ter sido adsorvido pela lignina e danificado sua molécula. A lignina por

sua vez, confere estabilidade à parede celular vegetal e possui a capacidade de adsorver íons metálicos como o Hg^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} e Cd^{2+} (Martins et al., 2008; Sanchez et al., 2010; Lv et al., 2012; Rengifo et al., 2013).

A fim de se obter uma estimativa do limite tolerável para a concentração de HgO na vermiculita que permita o desenvolvimento normal de *S. saponaria*, assumiu-se a diferença entre a média e uma unidade de desvio padrão para cada atributo do tratamento testemunha. A partir das equações obtidas (Tabela 3), as concentrações máximas toleradas pela plântula de *S. saponaria* foram de 0,0045 g/cm³, 0,0099 g/cm³, 0,0147 g/cm³ e 0,0443 g/cm³ para o comprimento da raiz principal, massas verdes do sistema radicular, de parte aérea e total, respectivamente. Em relação ao acúmulo de massa verde, o sistema radicular demonstrou maior sensibilidade às crescentes concentrações de HgO.

As plântulas de *S. saponaria* podem tolerar baixas concentrações de HgO (0,0045 g/cm³) sem causar maiores danos ao crescimento e massa verde vegetal, podendo ser utilizada como bioindicadora da qualidade ambiental. Mais estudos são necessários para a elucidação dos mecanismos que envolvem a absorção, desintoxicação e armazenamento de metais pesados por plantas, pois podem ser utilizados para o desenvolvimento de mate-

riais genéticos adequados para fitorremediação (Milner e Kochian, 2008).

Conclusão

A dormência das sementes de *S. saponaria* pode ser superada com a escarificação mecânica do tegumento com esmeril elétrico.

A germinação de sementes de *S. saponaria* não é influenciada pela presença de mercúrio no substrato vermiculita.

S. saponaria tolera baixas concentrações de HgO em vermiculita (0,0045 g/cm³) sem causar maiores danos ao seu crescimento e acúmulo de massa verde, podendo ser utilizada como bioindicadora da qualidade ambiental em sítios sujeitos à contaminação por mercúrio.

Sintomas de fitotoxicidade de HgO em plântulas de *S. saponaria* são caracterizados pela formação de raízes escuras e atrofiadas, caules tenros e folhas amareladas.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista pelo apoio e infraestrutura para a realização deste trabalho.

Referências

- Albiero, A. L. M.; Bacchi, E. M.; Mourão, K. S. M. 2001. Caracterização anatômica das folhas, frutos e sementes de *Sapindus saponaria* L. (Sapindaceae). *Acta Scientiarum*, 23: 549-560. Doi: <https://doi.org/10.4025/actasciobiolsci.v23i01.2733>.
- Appezato-da-Glória, B.; Carmello-Guerreiro, S. N. 2006. Anatomia Vegetal, Viçosa, UFV.
- Boening, D. W. 2000. Ecological effects, transport, and fate of Mercury: a general review. *Chemosphere*, 40: 1335-1351. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00283-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00283-0).
- Brasil. 2009. Regras para análise de sementes. Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária, Brasília: Mapa/ACS.
- Cicatelli, A.; Todeschini, V.; Biondi, S.; Torrigiani, P.; Castiglione, S. 2010. Arbuscular mycorrhizal fungi restore normal growth in a white poplar clone grown on heavy metal-contaminated soil, and this is associated with upregulation of foliar metallothionein and polyamine biosynthetic gene expression. *Annals of Botany*, 106: 791-802. Doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcq170>.
- Climate-data.org. 2019. Clima: São João Evangelista. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/location/175926/>.
- Conn, S.; Gilliam, M. 2010. Comparative physiology of elemental distributions in plants. *Annals of Botany*, 105: 1081/102. Doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcq027>.
- Cook, A.; Turner, S. R.; Baskin, J. M.; Baskin, C. C.; Steadman, K. J.; Dixon, K. W. 2008. Occurrence of physical dormancy in seeds of Australian Sapindaceae: a survey of 14 species in nine genera. *Annals of Botany*, 101: 1349-1362. Doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcn043>.
- Copete, E.; Herranz, J. M.; Ferrandis, P.; Baskin, C. C.; Baskin, J. M. 2011. Physiology, morphology and phenology of seed dormancy break and germination in the endemic Iberian species *Narcissus hispanicus* (Amaryllidaceae). *Annals of Botany*, 107: 1003-1016. Doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcr030>.
- Damas, G. B.; Bertoldo, B.; Costa, L. T. 2014. Mercúrio: da antiguidade aos dias atuais. *Revista Virtual Química*, 6: 1010-1020. Doi: <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20140063>.
- Freitas, A. R.; Lopes, J. C.; Matheus, M. T.; Mengarda, L. H. G.; Venancio, L. P.; Caldeira, M. V. W. 2013. Superação da dormência de sementes de jatobá. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 33: 85-90. Doi: <https://doi.org/10.4336/2013.pfb.33.73.350>.
- Goren, R.; Siegel, S. M. 1976. Mercury-induced ethylene formation and abscission in *Citrus* and *Coleus* explants. *Plant Physiology*, 57: 628-631. Doi: <https://doi.org/10.1104/pp.57.4.628>.
- Grisi, P. U.; Gualtieri, C. J.; Ranal, M. A.; Santana, D. G. 2013. Phytotoxic activity of crude aqueous extracts and fractions of young leaves of *Sapindus saponaria* L. (Sapindaceae). *Acta Botanica Brasílica*, 27: 62-70. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-33062013000100009>.
- Kehrig, H. A.; Malm, O.; Palermo, E. F. A.; Seixas, T. G.; Baêta, A. P.; Moreira, I. 2011. Bioconcentração e biomagnificação de metilmercúrio na baía de Guanabara, Rio de Janeiro. *Química Nova*, 34: 377-384. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422011000300003>.

- Kenderesová, L.; Stanová, A.; Pavlovkin, J.; Durisová, E.; Nadubinská, M.; Ciamporová, M.; Ovecka, M. 2012. Early Zn²⁺-induced effects on membrane potential account for primary heavy metal susceptibility in tolerant and sensitive *Arabidopsis* species. *Annals of Botany*, 110: 445-459. Doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcs111>.
- van Klinken, R. D.; Lukitsch, B.; Cook, C. 2008. Interaction between seed dormancy-release mechanism, environment and seed bank strategy for a widely distributed perennial legume, *Parkinsonia aculeata* (Caesalpinaceae). *Annals of Botany*, 102: 255-264. Doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcn087>.
- van Klinken, R. D.; Flack, L. 2005. Wet heat as a mechanism for dormancy release and germination of seeds with physical dormancy. *Weed Science*, 53: 663-669. Doi: <https://doi.org/10.1614/WS-05-008R.1>.
- Lv, J.; Luo, L.; Zhang, J.; Christie, P.; Zhang, S. 2012. Adsorption of mercury on lignin: combined surface complexation modeling and X-ray absorption spectroscopy studies. *Environmental Pollution*, 162: 255-261. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.11.012>.
- Maguire, J. D. 1962. Speed of germination aid in selection and evaluation for seedling and vigor. *Crop Science*, 2: 176-177. Doi: <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>.
- Marmiroli, M.; Pietrini, F.; Maestri, E.; Zacchini, M.; Marmiroli, N.; Massaci, A. 2011. Growth, physiological and molecular traits in Salicaceae trees investigated for phytoremediation of heavy metals and organics. *Tree Physiology*, 31: 1319-1334. Doi: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpr090>.
- Martins, G. F.; Pereira, A. A.; Stracçalano, B. A.; Antunes, P. A.; Pasquini, D.; Curvelo, A. A. S.; Ferreira, M.; Riul, J. R. A.; Constatino, C. J. L. 2008. Ultrathin films of lignins as a potential transducer in sensing applications involving heavy metal ions. *Sensors and Actuators B*, 129: 525-530. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.08.051>.
- Merck Millipore. 2019. 104466 Óxido de Mercúrio (II). Disponível em: http://www.merckmillipore.com/brazil/chemicals/oxido-de-mercurioii/MDA_CHEM-104466/p_ygib.s1LBqCAA EW D.EfVhTl.
- Milner, M. J.; Kochian, L. V. 2008. Investigating heavy-metal hyperaccumulation using *Thlaspi caerulescens* as a model system. *Annals of Botany*, 102: 3-13. Doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcn063>.
- Micaroni, R. C. C. M.; Bueno, M. I. M. S.; Jardim, W. F. 2000. Compostos de mercúrio. Revisão de métodos de determinação, tratamento e descarte. *Química Nova*, 23: 487-495. <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422000000400011>
- Neumann, P. M. 2008. Coping mechanisms for crop plants in drought-prone environments. *Annals of Botany*, 101: 901-907. Doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcn018>.
- Noriega-Luna, B.; Morales-Rodríguez, A. A.; Luna-Quintanilla, R.; Ulloa-Vásquez, T.; Cruz-Jiménez, G. C.; Serafín-Muñoz, A. H.; Gutiérrez-Ortega, N. L. 2016. Identificación de especies vegetales asociadas a jales del distrito minero de Guanajuato. *Acta Universitaria*, 26: 71-77. Doi: <https://doi.org/10.15174/au.2016.1465>.
- Oliveira, J. A.; Cambraia, J.; Cano, M. A. O.; Jordão, C. P. 2001. Absorção e acúmulo de cádmio e seus efeitos sobre o crescimento relativo de plantas de aguapé e de salvinia. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, 13: 329-341. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-31312001000300008>.
- Oliveira, L. M.; Bruno, R. L. A.; Silva, K. R. G.; Silva, V. D. M.; Ferrari, C. S.; Silva, G. Z. 2012. Germinação e vigor de sementes de *Sapindus saponaria* l. submetidas a tratamentos pré-germinativos, temperaturas e substratos. *Ciência Rural*, 42: 638-644. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782012000400010>.
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- Rashed, K. N.; Ciric, A.; Glamoclija, J.; Calhella, R. C.; Ferreira, I. C. F. R.; Sokovic, M. 2013. Antimicrobial and activity, growth inhibition of human tumour cell lines, and phytochemical characterization of the hydromethanolic extract obtained from *Sapindus saponaria* L. aerial parts. *BioMed Research International*, 2013: 1-9. Doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/659183>.
- Rengifo, V. E. G.; Jiménez, J. A. V.; Marín, G. C. Q. 2013. Lignina como adsorbente de metales pesados. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 7: 74-85. Disponível em: <https://revistas.upb.edu.co/index.php/investigacionesaplicadas/article/view/1756/1967>.
- Sanchez, E. M. S.; Cavani, C. S.; Leal, C. V.; Sanchez, C. G. 2010. Compósito de resina de poliéster insaturado com bagaço de cana-de-açúcar: influência do tratamento das fibras nas propriedades. *Polímeros*, 20: 194-200. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282010005000034>.
- Silva, K. A.; Martins, S. V.; Neto, A. M.; Demolinari, R. A.; Lopes, A. T. 2016. Restauração Florestal de uma Mina de Bauxita: Avaliação do Desenvolvimento das Espécies Arbóreas Plantadas. *Revista Floresta e Ambiente*, 23: 309-319. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.142515>.
- Silva, R. R.; Machado, P. F. L. 2008. Experimentação no ensino médio de química: a necessária busca da consciência ético-ambiental no uso e descarte de produtos químicos – um estudo de caso. *Ciência & Educação*, 14: 233-249. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-73132008000200004>.
- Taiz, L.; Zeiger, E. 2013. Fisiologia vegetal. 5. ed. Porto Alegre, Artmed.
- Toorop, P. E.; Cuerva, R. C.; Begg, G. S.; Locardi, B.; Squire, G. R.; Iannetta, P. M. 2012. Co-adaptation of seed dormancy and flowering time in the arable weed *Capsella Bursa-pastoris* (shepherd's purse). *Annals of Botany*, 109: 481-489. Doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcr301>.
- Turner, S. R.; Cook, A.; Baskin, J. M.; Baskin, C. C.; Tuckett, R. E.; Steadman, K. J.; Dixon, K. W. 2009. Identification and characterization of the water gap in the physically dormant seed of *Dodonaea petiolaris*: a first report for Sapindaceae. *Annals of Botany*, 104: 833-844. Doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcp171>.
- Voicu, M. C.; Zwiazek, J. J. 2010. Inhibitor studies of leaf lamina hydraulic conductance in trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.) leaves. *Tree Physiology*, 30: 193-204. Doi: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpp112>.
- Voicu, M. C.; Zwiazek, J. J.; Tyree, M. 2008. Light response of hydraulic conductance in bur oak (*Quercus macrocarpa*) leaves. *Tree Physiology*, 28: 1007-1015. Doi: <https://doi.org/10.1093/treephys/28.7.1007>.
- Wagmann, K.; Hautekèete, N. C.; Piquot, Y.; Meunier, C.; Schmitt, S. E.; Dijk, H. V. 2012. Seed dormancy distribution: explanatory ecological factors. *Annals of Botany*, 110: 1205-1219. Doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcs194>.
- White, P. J.; Brown, P. H. 2010. Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, 105: 1073-1080. Doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>.