



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

MARCELA PEREIRA LOURINHO

**SILÍCIO COMO MITIGADOR DOS EFEITOS DO CÁDMIO SOBRE O
METABOLISMO BIOQUÍMICO DE *Khaya ivorensis* A. Chev**

**BELÉM
2020**

MARCELA PEREIRA LOURINHO

**SILÍCIO COMO MITIGADOR DOS EFEITOS DO CÁDMIO SOBRE O
METABOLISMO BIOQUÍMICO DE *Khaya ivorensis* A. Chev**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte do requisito do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para obtenção do grau de Mestre.

Área de concentração: Ecologia e Ecofisiologia de Árvores.

Orientador: Prof. Dr. Cândido Ferreira de Oliveira Neto

Co-orientador: Dr. Glauco André dos Santos Nogueira

**BELÉM
2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L892s Lourinho, Marcela Pereira

Silício como mitigador dos efeitos do cádmio sobre o metabolismo bioquímico de *Khaya ivorensis* A. Chev / Marcela Pereira Lourinho. - 2020.
55 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências Florestais (PPGCF), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Cândido Ferreira de Oliveira Neto

Coorientador: Prof. Dr. Glauco André dos Santos Nogueira.

1. Metal Pesado. 2. Mogno Africano. 3. Atenuador do Estresse. 4. Toxidez. 5. Degradação Ambiental.
I. Oliveira Neto, Cândido Ferreira de , *orient.* II. Título

CDD 581.1

MARCELA PEREIRA LOURINHO

**SILÍCIO COMO MITIGADOR DOS EFEITOS DO CÁDMIO SOBRE O
METABOLISMO BIOQUÍMICO DE *Khaya ivorensis* A. Chev**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte do requisito do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para obtenção do grau de Mestre. Área de concentração: Ecologia e Ecofisiologia de Árvores.

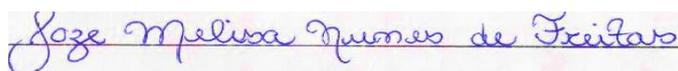
10/11/2020

Data da Aprovação

BANCA EXAMINADORA



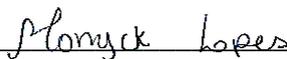
Dr. Cândido F. de Oliveira Neto - Presidente.
Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA.



Dra. Joze Melisa Nunes de Freitas – 1º examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA.



Dr. Ricardo Shigueru Okumura – 2º examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA.



Dra. Monyck Jeane dos Santos Lopes – 3º examinador
Museu Paraense Emilio Goeldi -MPEG

BELÉM

2020

Á Deus

*Aos meus pais Sidineya Pereira e
Ulisses Lourinho.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS INSTITUCIONAIS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de Pós-Graduação concedida a autora deste trabalho, no Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, da Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por todos os feitos em minha vida, guiando os meus passos, me proporcionando saúde, força e proteção.

Aos meus pais, Ulisses Lourinho e Sidineya Pereira por apesar todas as dificuldades, sempre estarem ao meu lado me apoiando e acreditando em mim. Em especial a minha mãe por todo o amor e proteção.

Aos meus orientadores Dr. Cândido Ferreira de Oliveira Neto e Dr. Glauco André dos Santos Nogueira, pela orientação, paciência e incentivo durante a construção deste trabalho.

A todos os meus professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da UFRA, por estarem sempre prontos a ajudar e servir como fonte de inspiração profissional.

Em especial ao Dr. Roberto Cezar Lobo da Costa e Dra. Joze Melisa Nunes de Freitas por sempre acreditarem em meu potencial, por todo o ensinamento, pelos puxões de orelha, por sempre estarem presentes me auxiliando e incentivando a sempre estudar e principalmente pelo laço de amizade que construímos.

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da UFRA, Lina Bufalino, pela dedicação aos alunos, e especial à secretária Andreza pela por ser essa excelente profissional e principalmente por sua bondade e paciência.

A todos meus amigos por me ajudarem a ser a profissional que me tornei, pela amizade, pela troca de conhecimento e por tudo que foi compartilhado. Agradeço imensamente ao Vitor Batista e Edson Cereja, por sua amizade e ajuda, pois só nós sabemos quantas noites passamos acordados trabalhando nos experimentos.

Aos meus avôs Celino Cardoso, Maria Pureza e em especial a Mercedes Maciel, por sempre acreditarem em meu potencial, participando de minha criação, me ensinando valores e princípios, fazendo o seu máximo e sempre orando á Deus desejando o meu melhor.

Agradeço de coração ao meu namorado Edson Cereja, por sempre acreditar em mim, me ajudar de diversas formas, pelo seu amor, pela sua paciência e por abdicar de seu conforto em detrimento de meus estudos.

E por fim e não menos importante a todas as pessoas que de qualquer forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e auxiliaram a transpor os obstáculos dessa trajetória.

“Com grandes poderes vêm grandes responsabilidades.”

-Stan Lee

RESUMO

O Cádmio (Cd) é um dos metais pesados mais tóxicos para plantas, animais e apresenta altos índices de acumulação nos solos. O Silício (Si) é utilizado como um nutriente benéfico, agindo como atenuador do estresse, regulando os processos de desintoxicação. O mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev), pertence à família Meliaceae e possui madeira nobre de grande potencial econômico para comercialização. O objetivo da pesquisa foi avaliar os efeitos do Cd sobre o metabolismo bioquímico de *K. ivorensis* A. Chev e a capacidade do silício para mitigar o estresse causado por esse metal. O experimento ocorreu na Universidade Federal Rural da Amazônia e o delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 4x4 com cinco repetições, e os fatores constituídos por níveis crescentes do metal pesado (Cd 0, 25, 50 e 75 mg L⁻¹) e doses de silício (Si 0, 100, 150 e 300 mg L⁻¹), totalizando 80 unidades experimentais, os dados obtidos foram submetidos à análise estatística, utilizando o software Statistica 7.0 (Statsoft, 2007). O estresse por Cd interferiu nas concentrações bioquímicas das folhas e raízes de mogno africano, aumentando o nitrato, amônio, prolina e glicina-betaína. Enquanto que os açúcares redutores, redutase do nitrato, glutamina sintetase e aminoácidos em folhas e raízes apresentaram uma redução à medida que as concentrações de Cd aumentaram. O Si não promoveu respostas satisfatórias no metabolismo da planta, não conseguindo atenuar o estresse por Cd nem na menor dose do metal (Cd 25 mg L⁻¹).

Palavras-chave: metal pesado. mogno africano. atenuador do estresse.

ABSTRACT

Cadmium (Cd) is one of the most toxic heavy metals for plants, animals and has high levels of accumulation in soils. Silicon (Si) is used as a beneficial nutrient, acting as a stress attenuator, regulating detoxification processes. African mahogany (*Khaya ivorensis* A. Chev), belongs to the Meliaceae family and has noble wood with great potential for commercialization. The objective of the research was to evaluate the effects of Cd on the biochemical metabolism of *K. ivorensis* A. Chev and the capacity of silicon to mitigate the stress caused by this metal. The experiment took place at the Federal Rural University of Amazon and the experimental design used was in randomized blocks, in a 4x4 factorial scheme with five replications, and the factors constituted by increasing levels of heavy metal (Cd 0, 25, 50 and 75mg L⁻¹), and doses of silicon (Si 0, 100, 150 and 300 mg L⁻¹), totaling 80 experimental units, the data obtained were submitted to statistical analysis, using the Statistica 7.0 software (Statsoft, 2007). The Cd stress interfered in the biochemical concentrations of African mahogany leaves and roots, increasing nitrate, ammonium, proline and glycine betaine. While the reducing sugar, nitrate reductase, glutamine synthetase and amino acids in leaves and roots showed a reduction as the Cd concentrations increased. Si did not promote satisfactory responses in the plant's metabolism, failing to mitigate the stress by Cd even at the lowest dose of the metal (Cd 25 mg L⁻¹).

Key-words: heavy metal. African mahogany. stress attenuator.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização do Experimento na UFRA.....30
- Figura 2.** Carboidratos Solúveis Totais em folha (a) e raíz (b), Açúcares Redutores em folha (c) e raíz (d) em plantas jovens de *K. ivorensis* A. Chev cultivadas em solução nutritiva, em função de concentrações crescentes de cádmio Cd e de Si.37
- Figura 3.** Nitrato em folha (a) e raíz (b), Redutase do Nitrato em folha (c) e raíz (d) em plantas jovens de *K. ivorensis* A. Chev cultivadas em solução nutritiva, em função de concentrações crescentes de cádmio Cd e de Si40
- Figura 4.** Amônio em folha (a) e raíz (b), Glutamina Sintetase em folha (c) e raíz (d) em plantas jovens de *K. ivorensis* A. Chev cultivadas em solução nutritiva, em função de concentrações crescentes de cádmio Cd e de Si.42
- Figura 5.** Aminoácidos em folha (a) e raíz (b), Prolina em folha (c) e raíz (d), Glicína Betaina em folha (e) e raiz (f) em plantas jovens de *K. ivorensis* A. Chev cultivadas em solução nutritiva, em função de concentrações crescentes de cádmio Cd e de Si.....45

Sumário

1.	CONTEXTUALIZAÇÃO:	12
1.2	HIPÓTESE E OBJETIVOS DA PESQUISA	17
	Hipótese:	17
	Objetivos:	17
	Objetivo geral:	17
	Objetivos específicos:	17
1.3.	Referências	18
2.	SILÍCIO COMO MITIGADOR DOS EFEITOS DO CÁDMIO SOBRE O METABOLISMO DO CARBONO E DO NITROGÊNIO EM PLANTAS DE <i>Khaya ivorensis</i> A. Chev.	26
2.1.	Introdução	27
2.2.	Material e métodos:	29
2.2.2.	Local do experimento	29
2.2.3.	Material vegetal e condições do experimento	29
2.2.4.	Concentrações de Cádmio e de silício	30
2.2.5.	Avaliações Bioquímicas:	30
2.2.6.	Determinação de Carboidratos Solúveis Totais:	30
2.2.7.	Determinação de Açúcares redutores:	31
2.2.8.	Determinação das concentrações de Nitrato (NO_3^-):	31
2.2.9.	Determinação da Redutase do Nitrato (RN):	32
2.2.10.	Determinação das concentrações de Amônio Livre:	32
2.2.11.	Determinação da Atividade da Glutamina Sintetase (GS):	33
2.2.12.	Determinação de Aminoácidos:	33
2.2.13.	Determinação das concentrações de Prolina:	34
2.2.14.	Determinação das concentrações de Glicina-betaína:	34
2.2.15.	Delineamento experimental e análise estatística:	35
2.3.	Resultados e Discussão	35
2.4.	Conclusão:	46
2.5.	Referências:	47

1. CONTEXTUALIZAÇÃO:

1.1.1. Metais pesados no meio ambiente

Os metais pesados são elementos que tem como principais propriedades os elevados níveis de reatividade e bioacumulação. Isto quer dizer que tais elementos, são capazes de desencadear diversas reações químicas não metabolizáveis e permanecer por muito tempo no ambiente (DUFFUS, 2002; SOUZA et al. 2018).

Alguns metais pesados, como cádmio (Cd), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg), não apresentam funções fisiológicas ou nutricionais nos seres vivos (CUI et al. 2005; SOARES et al. 2007), mas são poluentes ambientais por se acumularem nas plantas, provocando danos devido a toxidez (ATSDR, 2008; SILVA et al. 2015). O excesso dos metais também pode alterar as propriedades físico-químicas dos solos, diminuir atividades microbianas, ocasionar perdas de rendimento agrícola e redução da fertilidade dos solos (GAO et al. 2010; NOGUEIRA, 2018).

Esses elementos podem ocorrer no meio ambiente por fontes naturais, tais como: intemperismo das rochas, da lixiviação de solos e atividade vulcânica podendo ser encontrado na água e no solo (KLEIN & HOEHNE, 2015). E também ocorrem por fontes antrópicas, tais como: mineração, beneficiamento de metais, atividades industriais, aplicação de fertilizantes e defensivos em atividades agrícolas (ALMEIDA et al. 2008; AUGUSTO et al. 2014), resíduos de artigos eletrônicos, lodo de esgoto e compostos orgânicos provenientes da reciclagem do lixo urbano (MORAES, 2011; SILVA et al. 2015).

Sendo a fonte antrópica um problema grave de contaminação ambiental por metais (SILVA, 2014; OLIVEIRA & JUCÁ, 2014). Onde o crescimento populacional e industrial, são alguns dos fatores que ocasionam problemas de contaminação, devido ao aumento da deposição de metais pesados nos diversos compartimentos da biosfera (KEMERICH et al. 2014; SILVA et al. 2015).

A conscientização ambiental vem crescendo ao longo dos anos, seguida de um aumento do interesse em pesquisas com espécies arbóreas nativas visando à recuperação de áreas degradadas (CARNEIRO, 1995; JOSÉ, 2003; PAIVA, 2003). Essas degradações são ocasionadas por diversos fatores, dentre eles a contaminação por metais pesados, (TAVARES, 2013).

1.1.2. Cádmi

O Cd é um elemento metálico branco-azulado e muito dúctil (FERNANDES et al. 1996), sendo considerado um dos mais perigosos para os seres vivos por estar ocupando o sétimo lugar na lista das 20 substâncias com maior potencial toxicológico do mundo (ALLOWAY, 1990; ATSDR, 2011; DEDE & OZDEMIR, 2016). Uma das principais rotas de exposição humana ao Cd é o consumo de vegetais cultivados em áreas contendo altos teores desse elemento (ATSDR, 2008; SILVA et al., 2015).

Esse metal pesado não é um elemento essencial mas é absorvido pelas plantas, por apresentar-se no solo na forma trocável e ser mais biodisponível quando comparado a outros íons, devido a sua alta mobilidade nos solos, podendo ser altamente reativo e bio-acumulativo (BISINOTI et al. 2004; RIBEIRO FILHO et al. 1999; SOARES et al. 2007; DEDE & OZDEMIR, 2016). Uma das fontes do Cd encontrado no meio ambiente advem de práticas agrícolas pela utilização do fosfato mineral (TIRADO & ALLSO, 2012).

Segundo Abin & Majeti (2013), o Cd é um metal de transição que é liberado no meio ambiente como um poluente, sendo encontrado na atmosfera por atividades antropogênicas e fontes naturais. A Contaminação por esse elemento nos corpos hídricos ocorre principalmente via liberação de água rica em Cd de várias fontes industriais. Nas indústrias o Cd é utilizado na composição de ligas metálicas, para a fabricação de pilhas, corantes na indústria têxtil e especialmente na composição de pesticidas agrícolas, sua principal forma de entrada e deposição na superfície terrestre (POPP, 1998; CETESB, 2012).

O Cd naturalmente ocorre ligado a outros elementos no solo sob a forma de Cd^{2+} , sulfato de cádmio ($CdSO_4$) e cloreto de cádmio ($CdCl_2$), sendo os mais frequentes (CHOPPALA et al., 2014). E na água nas formas Cd^{2+} , carbonato de cádmio ($CdCO_3$), hidróxido de cádmio $Cd(OH)_2$ e sulfeto de Cádmio (CdS) (PRASAD, 2004; SMOLDERS; MERTENS, 2013).

1.1.3. Efeito do Cd em plantas

Alguns elementos exercem papel fundamental na nutrição mineral das plantas, sendo importantes como micronutrientes e macronutrientes. Porém quando as plantas absorvem metais não essenciais como o Cd, se torna perigoso por esse elemento causar efeito tóxico podendo levar a morte das plantas (SILVA, 2014; SILVA et al. 2015).

O mecanismo de toxidez nas plantas envolve uma rede complexa de mobilização e absorção do elemento pelas raízes e transporte, sequestro e distribuição no espaço intracelular da planta (CLEMENS et al. 2002), com efeitos em níveis bioquímicos e moleculares que podem provocar desequilíbrio de metais essenciais (SHARMA & DUBEY, 2005), danos a biomoléculas, estresse oxidativo e, conseqüentemente, efeitos no desenvolvimento da planta (HOSSAIN et al. 2011; SILVA et al. 2015).

O Cd, assim como outros elementos são absorvidos pela via simplástica ou apoplástica e são transportados radialmente através do córtex da raiz até o xilema, onde seguem para a parte aérea. O Cd pode chegar ao xilema pela via simplástica através do citoplasma de células individuais do córtex, ligadas por plasmodesmas (LUX et al. 2011). A maioria dos íons Cd absorvido pelas plantas permanecem nas raízes e somente uma pequena parte desses íons é transportada para a parte aérea (HASAN et al. 2009).

A toxidez por Cd nas folhas pode causar a desestabilização do aparato fotossintético e modificações na condutância estomática e transpiração foliar, gerando alterações morfofisiológicas nas plantas e distúrbios metabólicos do sistema fonte e dreno (NOGUEIRA, 2018; ROY et al. 2016), assim como na produção de biomassa (KNECHT et al. 1994; SOLTAN; BENAVIDES et al. 2005).

A fotossíntese das plantas exposta a contaminação por metais pesados é comprometida, pois esses elementos podem reduzir os níveis de clorofila e carotenoides, pela inativação das enzimas responsáveis pela biossíntese desses pigmentos. Efeitos prejudiciais na cadeia transportadora de elétrons também são relatados, assim como inativação das enzimas do ciclo de Calvin (RODRIGUES et al. 2016; KÜPPER et al. 2007; SOUZA et al. 2009).

A quelação de metais pesados é um mecanismo muito importante de desintoxicação e tolerância a esses elementos, pois eles são envolvidos por ligantes de alta afinidade como aminoácidos, ácidos orgânicos e peptídeos como as fitoquelatinas e metalotioneínas (HALL, 2002). A ligação dos metais com os quelantes contribui para a redução desses elementos no citossol, reduzindo sua reatividade, solubilidade e conseqüentemente o aparecimento de seus efeitos tóxicos nas plantas. (SANTOS et al. 2011; SOUZA et al. 2013a).

Em condições de estresse por metais pesados, as plantas podem desenvolver diferentes mecanismos de tolerância. Neste sentido, as respostas das plantas aos metais variam amplamente dependendo das características intrínsecas da espécie, do tipo de

metal e das condições ambientais circundantes (SOUZA et al. 2013b; SILVA et al. 2015).

1.1.4. Silício nas plantas

Apesar do Si não ser, em geral, considerado um dos elementos essenciais para as plantas, algumas práticas culturais com este elemento estão sendo cada vez mais utilizadas para aumentar o grau de resistência delas (ARNON & STOUT, 1939; LIANG et al. 2015). Esse elemento é absorvido na forma de H_4SiO_4 (ácido monossilícico) e se acumula nos tecidos das plantas (MA & YAMAJI, 2008; ROCHA, 2017).

Alguns autores têm relatado a importância do silício (Si) na planta como agente atenuador na fitotoxicidade de metais, como o Cd (BAYLIS et al. 1994; LIANG et al. 2005; PINTO et al. 2009). O mecanismo primário de mitigação de estresse por metal pesado induzido por Si consiste na sua deposição na endoderme radicular, reduzindo a absorção de íons tóxicos (MA E GUO, 2014) e restringindo a translocação para os órgãos da parte aérea devido a um bloqueio físico da rota apoplástica (DA CUNHA & NASCIMENTO, 2009). Outros estudos tratam o Si na agricultura como um elemento promissor no desenvolvimento de resistência a diferentes tipos de estresses bióticos e abióticos (SAHEBI et al. 2016; ZHU & GONG, 2014).

O efeito benéfico do Si deve-se à manutenção do potencial hídrico foliar, ajuste de osmólitos compatíveis e redução do estresse oxidativo, preservação de pigmentos fotossintéticos (GONG et al. 2005; AMIN et al. 2014; BOKHTIAR et al. 2012)

1.1.5. Mogno Africano (*Khaya ivorensis* A. Chev)

A *K. ivorensis* A. Chev, tem origem africana e pertence à família Meliaceae, é uma espécie que atingem grandes dimensões, com altura variando de 30 a 35 metros, podendo chegar à altura superior a 60 metros, o tronco pode atingir 2 metros de diâmetro. As folhas são parepinadas, sendo decíduas ou sempre verdes. As sementes são aladas, achatadas e numerosas (LEMMENS, 2008; PINHEIRO et al. 2011; CABI, 2013). Possui madeira nobre de grande potencial econômico para comercialização interna e externa, podendo ser empregada na indústria moveleira, naval, construção civil, painéis e laminados (PINHEIRO et al. 2011; RIBEIRO et al. 2017).

No Brasil a espécie é conhecida como mogno africano, sendo as regiões Norte e Sudeste as maiores produtoras (PINHEIRO et al. 2011). Foi introduzido no Brasil em 1973, e adaptou-se muito bem às condições climáticas do país, o plantio começou no Estado do Pará, pela Embrapa Amazônia Oriental, com sementes oriundas da Costa do Marfim. Inicialmente foram produzidas mudas, que logo se tornaram matrizes (CORREIA, 2015; PINHEIRO et al. 2011).

A *K. ivorensis* é uma planta heliófila, porém tolerante a sombra durante a fase jovem (FOLI, 2000; BATISTA, 2010), com crescimento relativamente rápido, sua raiz é pivotante, com secundárias tabulares (LEMMENS, 2008; VERZIGNASSI et al. 2015), sendo ainda classificada como espécie pioneira ou secundária tardia (BUDOWSKI, 1965; DENSLOW, 1987), regenerando em clareiras abertas na floresta (SWAINE & WHITMORE, 1988; RIBEIRO et al. 2017).

Além das propriedades ótimas da madeira da *K. ivorensis*, a espécie desperta o interesse em estudos para uso medicinal, como pode ser visto em (ZHANG et al. 2009; TEPONGNING et al. 2011) e usado como fitoterápico no tratamento de malária (TEPONGNING et al. 2013; TAIWO & OGUNBODEDE, 1995; PINHEIRO et al. 2011).

A fim de minimizar os efeitos decorrentes do impacto ambiental, algumas plantas estão sendo utilizadas no processo conhecido por fitorremediação: que é uma tecnologia que consiste no uso de vegetais para a recuperação ambiental, reduzindo ou, até mesmo, eliminando a toxicidade dos contaminantes. (ACCIOLY e SIQUEIRA, 2000; RODRIGUES & ORLANDELLI, (2018).

1.2 HIPÓTESE E OBJETIVOS DA PESQUISA

Hipótese:

- **H:** O Cd pode afetar o metabolismo do mogno africano e o Si é capaz de mitigar o estresse causado por esse metal.

Objetivos:

Objetivo geral:

- Avaliar os efeitos do Cd sobre o metabolismo do carbono e do nitrogênio de *Khaya ivorensis* A. Chev e a capacidade do Si para mitigar o estresse causado por esse metal.

Objetivos específicos:

- Avaliar os efeitos do Cd sobre os parâmetros bioquímicos (Carboidratos solúveis totais, Açúcares redutores, Nitrato, Redutase do Nitrato, Amônio Livre, Glutamina Sintetase, Aminoácidos, Prolina e Glicina-Betaina) da parte aérea e do sistema radicular.
- Avaliar o efeito do Si como mitigador do estresse pelo Cd nas variáveis bioquímicas.

1.3. Referências

ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R.F. et al. Tópicos em ciência do solo. **Viçosa**: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.299-352, 2000.

ABIN, S.; MAJETI, P. Cadmium minimization in rice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **Springer Verlag/EDP Sciences/INRA**, 2014, 34 (1), pp.155-173. ff10.1007/s13593-013- 0152-yff. fhal-01234779f.

ALBUQUERQUE MPF, MORAES FKC, SANTOS RIN, Castro GLS, RAMOS EMLS, PINHEIRO HA. Ecofisiologia de plantas jovens de mogno africano submetidas a deficit hídrico e reidratação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**; v.48, n.1, p. 9-16, 2013.

ALLOWAY, B. J. Heavy metals in soils. **New York**: John Wiley, 339p.,1993.

ALLOWAY, B.J. Heavy Metals in Soils. **New York**: John Wiley & Sons, 339p.,1990.

ALMEIDA, E. L.; MARCOS, F. C. C.; SCHIAVINATO, M. A.; LAGÔA, A. M. M. A.; ABREU, M. F. Crescimento de feijão-de-porco na presença de chumbo. **Bragantia**, v. 67, n. 3, p. 569-576, 2008.

AMIN, M., AHMAD, R., BASRA, S.M.A., MURTAZA, G. Silicon induced improvement in morpho-physiological traits of maize (*Zea mays* L.) under water deficit. **Pakistan Journal of Agricultural Science**, v.51, p.187-196, 2014.

ARNON, D.I., STOUT, P.R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant Physiology**, 14, 371–375, 1939.

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). Toxicological Profile for Cadmium. U.S. Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services, **Atlanta**, GA. 2008.

ATSDR - Agency for Toxic Substances & Disease Registry. 2008. Disponível em:<<http://www.atsdr.cdc.gov/cercla/05list.html>>. Acesso em: 20 maio. 2019.

AUGUSTO, A. S.; BERTOLI, A. C.; CANNATA, M. G.; CARVALHO, R.; BASTOS, A. R. R. Avaliação dos efeitos tóxicos de Cd e Pb na cultura da mostarda (*Brassicajuncea*). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. spe, p. 61-68, 2014.

BATISTA F. Mogno Africano, cultivo no estado de Minas Gerais. Piracicaba: **Casa do Produtor Rural**; 2010.

BAYLIS, A. D. et al. Effect of silicon on the toxicity of aluminium in soybean. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**, v.25, n.5, p.537-546, 1994.

BENAVIDES, M. P.; GALLEGO, S. M.; TOMARO, M. L. Cadmium toxicity. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, p. 21-34, 2005.

BISINOTI MC, YABE MJS E GIMENEZ SMN. Avaliação da influência de metais

pesados no sistema aquático da bacia hidrográfica da cidade de Londrina – PR. **Revista Analytica**. 8: 22-27, 2004.

BOKHTIAR, S.M., HUANG, H-R., LI, Y-R, DALVI, V.A. Effects of silicon on yield contributing parameters and its accumulation in abaxial epidermis of sugarcane leaf blades using energy dispersive x-ray analysis. **Journal of Plant Nutrition**, v.35, p.1255-1275, 2012.

BUDOWSKI G. Distribution of tropical American rainforest species in light of sucessional processes. **Turrialba**; 15: 40-43, 1965.

Centre for Agriculture and Biosciences International – CABI. **Forestry Compendium** [online]. Wallingford: CAB International; 2013.

CARNEIRO, J. G. A. Produção e controle de qualidade de mudas florestais. **Curitiba: UFPR /FUPEF/Campos: UENF**. p.451, 1995.

CARVALHO, F. P. Implicações do uso de herbicidas em plantas de café micorrizadas. 2014. 62 f. **Tese** (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

CETESB – Companhia de tecnologia de saneamento ambiental. **Valores orientadores para solos e águas subterrâneas do estado de São Paulo**. Decisão da Diretoria n° 195/2005. 2005. 4 p.

CHAVES, L.H.G. et al. Crescimento, distribuição e acúmulo de cobre e zinco em plantas de pinhão-manso. **Rev. Ciênc. Agron.** v.41, n.2, p.167-176, 2010.

CLEMENS, S.; PALMGREN, M. G.; KRÄMER, U. A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. **Trends in plant science**, v. 7, n. 7, p. 309-315, 2002.

CORREIA, L. G. B. Identificação e estudo das áreas favoráveis para o cultivo da *Khaya ivorensis* A. Chev. (mogno africano) no estado de Minas Gerais, utilizando modelagem ambiental e análise multicritério. **Dissertação** (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais). Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

CUI, Y. et al. Exposure to metal mixtures and human health impacts in a contaminated area in Nanning, China. **Environment International**, v.31, p.784-790, 2005.

CHUGH, L. K.; SAWHNEY, S. K. Photosynthetic activities of *Pisum sativum* seedlings grown in presence of cadmium. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.37, n.4, p.297-303, 1999.

DA CUNHA, K. P. V., & DO NASCIMENTO, C. W. A. Silicon effects on metal tolerance and structural changes in maize (*Zea mays* L.) grown on a cadmium and zinc enriched soil. **Water, air, and soil pollution**, v. 197, n. 1-4, p. 323, 2009.

DEDE, G., & OZDEMIR, S. Effects of elemental sulphur on heavy metal uptake by plants growing on municipal sewage sludge. **Journal of environmental management**, v.166, p.103-108, 2016.

DELL, B.; MALAJCZUK, N.; GROVE, T.S. **Nutrient disorders in plantation eucalypts**. Canberra, BPD Graphic Associates, 104p., 1995.

DENSLOW JS. Tropical rainforest gaps and tree species diversity. **Annual Review of Ecology and Systematics**; v.18, n.1: 431-451, 1987.

DEUS ACF, DE MELLO PRADO R, ALVAREZ RDCF, DE OLIVEIRA RLL, FELISBERTO G. Role of silicon and salicylic acid in the mitigation of nitrogen deficiency stress in rice plants. **Silicon** 1:9, 2019.

DUFFUS, J.H. Heavy metals - A meaningless term? **Pure and Applied Chemistry**, v. 74, n. 5, p. 793-807, 2002.

FERNANDES, F.; LUFT, C.P.; GUIMARÃES, F.M. **Dicionário Brasileiro Globo**. 42.ed. São Paulo: Globo, 1996.

FOLI EG. Evaluation of the performance of planted native timber species in different ecological zones in Ghana [project PD 1/93. Final Technical Fellowship Report]. **Yokohama**: International Tropical Timber Organization; 41 p., 2000.

GAO, S. et al. Growth and antioxidant responses in *Jatropha curcas* seedling exposed to mercury toxicity. **Journal of Hazardous Materials**, v. 182, n. 1, p. 591-597, 2010.

GONG, H., ZHU, X., CHEN, K., WANG, S., ZHANG, C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v.169, p.313-321, 2005.

GUIMARÃES, M. D. A.; SANTANA, T. A.; SILVA, E. V.; ZENZEN, I. L.; LOUREIRO, M. E. Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. **Revista Trópica-Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 2, n. 5, 2008.

HALL, J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. **Journal of Experimental Botany**. V. 53, n. 1, 2002.

HASAN, S.A; FARIDUDDIN, Q; ALI, B; HAYAT, S; AHMAD, A. Cadmium: toxicity and tolerance in plants. J. Environ. Boil. Acad. **Environ. Biol.** India, v.30, n.2, p.165-174, 2009.

HOSSAIN, M. A.; PIYATIDA, P.; SILVA, J. A. T.; FUJITA, M. Molecular Mechanism of Heavy Metal Toxicity and Tolerance in Plants: Central Role of Glutathione in Detoxification of Reactive Oxygen Species and Methylglyoxal and in Heavy Metal Chelation. **Journal of Botany**, v. 2012, p. 1-37, 2012.

HOSSEINI SA, NASERI RAD S, ALI N, YVIN JC. The ameliorative effect of silicon on maize plants grown in mg-deficient conditions. **International Journal of Molecular Sciences** 20:969, 2019.

JOSÉ, A. C. Utilização de mudas de espécies florestais produzidas em tubetes e sacos plásticos para revegetação de áreas degradadas. 2003. 101f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. Trace elements in soils and plants. **Boca Raton**: CRC Press, 2001. 413p.

KEMERICH, P. D. C.; FLORES, C. E. B.; BORBA, W. F.; GERHARDT, A. E.; FLORES, B. A.; RODRIGUES, A. C.; BARROS, G. Indicativo de contaminação ambiental por metais pesados em aterro sanitário. **Revista Monografias Ambientais**, v. 13, n. 4, p. 3744-3755, 2014.

KNECHT, J. A.; VAN DILLEN, M.; KOEVOETS, P. L. M.; SCHAT, H.; VERKLEIJ, J. A. C.; ERNST, W. H. O. Phytochelatins in cadmium-sensitive and cadmium-tolerant *Silene vulgaris*. **Plant Physiology**, v. 104, p. 255-261, 1994.

KLEIN, F. C.; HOEHNE, L. Determinação de chumbo em solo de uma antiga fábrica de acumuladores elétricos e proposta de remediação. **Destaques Acadêmicos**, v.6, n. 4, p. 66-75, 2015.

KÜPPER, H.; PARAMESWARAN, A.; LEITENMAIER, B.; TRTÍLEK, M.; SETLÍK, I. Cadmium-induced inhibition of photosynthesis and long-term acclimation to cadmium stress in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. **New Phytologist**. v. 175, n. 1, 2007. [PubMed]

LASAT, M. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. **Journal of Environmental Quality**, v.31, n.109, 2002.

LEMMENS RHMJ. *Khaya ivorensis* A. Chev [online]. Wageningen: **PROTA**; 2008.

LIANG, NY., NIKOLIC, M., BÉLANGER, R., HAIJUN, G., SONG, A. Silicon in Agriculture. From Theory to Practice. **Dordrecht**: Dordrecht: Springer, p. 235, 2015.

LIANG, Y. et al. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environmental Pollution**, v.147, p.422-428, 2007.

LUX, A; MARTINKA, M; VACULÍK, M AND WHITE, P.J. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review. **J. Exp. Bot.**, 1-17, 2011.

MA, J.F., YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. Cellular and molecular life sciences: **CMLS**, 65, 3049–3057, 2008.

MAILLARD A, ALI N, SCHWARZENBERG A, JAMOIS F, YVIN JC, HOSSEINI SA. Silicon transcriptionally regulates sulfur and ABA metabolism and delays leaf senescence in barley under combined sulfur deficiency and osmotic stress. **Environmental and Experimental Botany**, 155:394-410, 2018.

MARQUES, J.J.G.S.M.; CURI, N.; SCHULZE, D.G. Trace elements in Cerredo soils. In: ALVAREZ, V.V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Eds.). Tópicos em ciência do solo. **Viçosa**: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, p.103-142, 2002.

MARQUES, T. C.L. L. de S. e M. et al. Respostas fisiológicas e anatômicas de plantas jovens de eucalipto expostas ao cádmio. **Rev. Árvore**, Viçosa, v.35, n.5, p.997-1006, Oct. 2011.

MING, D.F., PEI, Z.F., NAEEM, M.S., GONG, H.J., ZHOU, W.J. Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment. **Journal of Agronomy and Crops Science**, v.198, p.14-26, 2012.

MONNI, S. et al. Ecophysiological responses of *Empetrum nigrum* to heavy metal pollution. **Environmental Pollution**, v.112, n.1, p.121-129, 2001.

MORAES, C. L. Alterações bioquímicas, fisiológicas e ultra estruturais em sementes e plantas de tomate expostas ao chumbo. 2011. 70f. **Tese** Doutoradoem Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.

NOGUEIRA, G. A. dos S. Trocas Gasosas, Crescimento e Comportamento Bioquímico em Plantas Jovens de Paricá (*Schizolobium Amazonicum* Huber ex Ducke) em Diferentes Concentrações de Cádmio. 2018. 68f. **Tese** (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, 2018.

OLIVEIRA, L. R. Metais pesados e atividade enzimática em Latossolos tratados com lodo de esgoto e cultivados com milho. 2008. 108f. **Tese** (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Jaboticabal, 2008.

OLIVEIRA, A. P.; ESPINOZA-QUIÑONES, F. R.; MÓDENES, A.; BRAGIÃO, M.; BEZERRA, I. Avaliação da influência do fósforo na bioacumulação do chumbo pela *Eichhornia crassipes*. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 1, p.539-544, 2014.

PAIVA, H.N.; VITAL, B.R. Escolha da espécie florestal. Viçosa, MG: **Universidade Federal de Viçosa**, 2003. 42p. (Cadernos Didáticos)

PAIVA, H. N. DE; CARVALHO, J. G. DE; SIQUEIRA, J. O. Índice de translocação de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) submetidas a doses crescentes de cádmio, níquel e chumbo. **Revista Árvore**, v26, n. 4, p. 467-473, 2002.

PINHEIRO, A. L.; COUTO L.; PINHEIRO, D.T.; BRUNETTA, J. M. F. C. Ecologia, silvicultura e tecnologia de utilizações dos mognos-africanos (*Khaya* spp.). **Viçosa**: Sociedade Brasileira de Agrossilvicultura; 2011.

PINTO, S. I. do C. et al. Silício como amenizador da fitotoxicidade de zinco em plantas jovens de *Eucalyptus urophylla* cultivadas em solução nutritiva. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1005-1014, Dec. 2009.

POLETTI, G. D; ETHUR, E. M.; HOEHNE, L. Determinação de cádmio e chumbo em solos usados em plantações de erva-mate sem e com diferentes tipos de manejo na região sul do país. **Destques Acadêmicos**, v. 6, n. 4, p. 59-65, 2014.

POPP, J.H. **Geologia geral**. Rio de Janeiro, RJ: LTC Editora, 1998. 376 p.

PRASAD, M. N. V. Heavy Metal Stress in Plants. From Biomolecules to Ecosystems. **2 ed. Springer**. Berlim, Alemanha. 2004. 455p.

OLIVEIRA, M. R. Investigação da contaminação por metais pesados da água e do sedimento de corrente nas margens do rio São Francisco e tributários, a jusante da represa da CEMIG, no município de Três Marias, Minas Gerais. **Tese** (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 149, 2007.

RIBEIRO FILHO, M. R. et al. Metais pesados em solos de rejeitos de indústria de processamento de zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.3, p.453-464, 1999.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S. O Cultivo do Mogno Africano (*Khaya spp.*) e o Crescimento da Atividade no Brasil. **Floresta Ambient.**, Seropédica, v.24, e00076814, 2017.

ROCHA, J. G. da. Efeitos do silício na energética e respostas a estresses em abacaxizeiro (*Ananas comosus L., Merrill*) via modulação das bombas de prótons. 2017. 69f. **Tese** (Doutorado no Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias) – UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO, 2017.

RODRIGUES, P. T. A.; & ORLANDELLI, R. C. Plantas como Ferramentas para a Remediação Ambiental: uma Revisão da Literatura. **Revista UNICIÊNCIAS**, v. 22, n. 1, p. 38-44, 2018.

RODRIGUES, A. C. D.; SANTOS, A. M.; SANTOS, F. S.; PEREIRA, A. C. C.; SOBRINHO, N. M. B. A. Mecanismos de Respostas das Plantas à Poluição por Metais Pesados: Possibilidade de Uso de Macrófitas para Remediação de Ambientes Aquáticos Contaminados. **Rev. Virtual Quim.**v. 8, n.1, p. 262-276. 2016.

ROY, S. K.; CHO S. W.; KWON, S. J.; KAMAL, A. H.; KIM, S. W.; OH, M. W.; LEE, M. S.; CHUNG, K. Y.; XIN, Z.; WOO, S. H. Morpho-physiological and proteome level responses to cadmium stress in sorghum. **PLOS ONE**, v. 11, n.11, p. 1-27, 2016.

SAHEBI, M. et al. Application of silicon in plant tissue culture. **In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant**, v. 52, n. 3, p. 226-232, 2016.

SANITÀ di TOPPI, L.; GABBRIELLI, R. Response to cadmium in higher plants. **Environmental Experimental Botany**, v.41, n.2, p.105-130, 1999.

SHARMA, P.; DUBEY, R. S. Lead toxicity in plants. **Brazilian journal of plantphysiology**, v. 17, n. 1, p. 35-52, 2005.

SILVA, E.; SANTOS, P. S.; GUILHERME, M. DE F. DE S. Agrarian academy, **Centro Científico Conhecer** - Goiânia, v.2, n.03; p. 21, 2015.

SILVA, P. R. C. Avaliação da fito e genotoxicidade do chumbo em *Lactucasativa L.* **Dissertação** (Mestrado em Genética Molecular Comparativa eTecnológica) - Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real. 180p, 2014.

SINGH, S.; EAPEN, S.; D'SOUZA, S. F. Cadmium accumulation and its influence on lipid peroxidation and antioxidative system in an aquatic plant, *Bacopa monnieri* L. **Chemosphere**, v.62, n.2, p.233-241, 2006.

SMOLDERS, E.; MERTENS, J. "Cadmium" em Heavy Metals in Soils. Trace Metals and their Bioavailability. Ed. 3. Edição Alloway, B.J.; **Springer**. Environmental Pollution. Nova Iorque, EUA. 2013.

SOARES, C. R. F. S.; SIQUEIRA, J. O.; CARVALHO, J. G.; & GUILHERME, L. R. G. Nutrição fosfática e micorriza arbuscular na redução da toxicidade de cádmio em trema [*Trema micrantha* (L.) Blum.]. **Revista Árvore**, v. 31, n. 5, p. 783-792, Oct. 2007.

SOARES, C.R.F.S. et al. Fitotoxicidade de cádmio para *Eucalyptus maculata* e *E. urophylla* em solução nutritiva. **Revista Árvore**, v.29, n.2, p.175-183, 2005.

SANTOS, F. S. DOS; DO AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; MAZUR, N.; GARBISU, C.; BARRUTIA, O.; BECERRIL, J. M. Resposta antioxidante, formação de fitoquelatinas e composição de pigmentos fotoprotetores em *Brachiaria decumbens* Stapf submetida à contaminação com Cd e Zn. **Química Nova**. v.34, n. 16, 2011.

SOUZA, A. K. R.; MORASSUTI, C. Y.; DE DEUS, W. B. Poluição do ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores. **Acta Biomedica Brasiliensia**. V. 9, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.18571/acbm.189>

SOUZA, L. C. P.; REISSMANN, C. B. Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo. I - Fitoextração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1879-1888, 2009.

SOUZA, E. P. D.; SILVA, I. D. F. D.; FERREIRA, L. E. Mecanismos de tolerância a estresses por metais pesados em plantas. **Current Agricultural Science and Technology**, v. 17, n. 167, 2013(a).

SOUZA, L.A.; LÓPEZ ANDRADE, S.A.; RIBEIRO SOUZA, S.C. & SCHIAVINATO, M.A. Evaluation of mycorrhizal influence on the development and phytoremediation potential of *Canavalia gladiata* in Pb-contaminated soils. **International Journal of Phytoremediation** 15: 465-476, 2013(b).

SOUZA, V. L.; SILVA, D. D. C.; SANTANA, K. B.; MIELKE, M. S.; ALMEIDA, A. F.; MANGABEIRA, P.A.O.; ROCHA, E.A. Efeitos do cádmio na anatomia e na fotossíntese de duas macrófitas aquáticas. **Acta Botanica Brasílica**. v. 23, n. 343, 2009.

STOLT, J. P.; SNELLER, F. E. C.; BRYNGELSSON, T.; LUNDBOR, T.; SCHAT, H. Phytochelatin and cadmium accumulation in wheat. **Environmental of Experimental Botany**, v. 49, p. 21-28, 2003.

SWAINE M. D.; WHITMORE T. C. On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. **Vegetatio**; 75(1-2): 81-86, 1988.

TAIWO, E.A.; OGUNBODEDE, R. A. Production of tannin adhesives from bark of Nigerian trees. **Wood Science and Technology**; v.29, n.2, p. 103-108, 1995.

TAVARES, S. R. DE L. Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: Conceitos básicos e fundamentos / Silvio Roberto de Lucena Tavares. **Rio de Janeiro**, RJ: 2013 147p.: il.

TEPONGNINGRS, LUCANTONI L, NASUTICC, DORI GU, YERBANGA SR, LUPIDI G ET AL. Potential of a Khaya ivorensis – Alstonia boonei extract combination as antimalarial prophylactic remedy. **Journal of Ethnopharmacology**; v.137, n. 1, p. 743-751, 2011.

TEPONGNING RS, YERBANGA SR, DORI GU, LUCANTONI L, LUPIDI G, HABLUETZEL A. In vivo efficacy and toxicity studies on Erythrina senegalensis and Khaya ivorensis used as herbal remedies for malaria prevention in Cameroon. **European Journal of Medicinal Plants**; v. 3, n.3, p. 454-464, 2013.

TIRADO, R., & ALLSOPP, M. Phosphorus in agriculture: problems and solutions. **Greenpeace Research Laboratories Technical Report** (Review), v.2, 2012.

VASCONCELLOS, M. C.; PAGLIUSO, D.; SOTOMAIOR, V. S. Fitorremediação: uma proposta de descontaminação do solo. **Estud. Biol.: Ambiente Divers.**, v.83, n.34, p.261-267, 2012.

VERZIGNASSI, J. R.; POLTRONIERI, L. S.; BENCHIMOL, R. L. Mancha-alvo em VIEIRA, Licielo Romero et al. Toxicidade de cádmio em plantas. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)**, v. 19, n. 2, p. 1574-1588, 2015.

YANG, X. et al. Influx, transport, and accumulation of cadmium in plant species grown at different Cd²⁺ activities. **Journal Environmental Science Health**, v.30, n.4, p.569-583, 1995.

ZHANG, B.; YANG, S.P.; YIN, S.; ZHANG, C. R.; WUY, Y. J. M. Limonoids from Khaya ivorensis. **Phytochemistry**; 70(10): 1305-1308, 2009. PMID:19666181.

ZHU, Y.; GONG, H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. **Agronomy for Sustainable Development**, v.34, n.2, p.455-472, 2014.

2. **SILÍCIO COMO MITIGADOR DOS EFEITOS DO CÁDMIO SOBRE O METABOLISMO DO CARBONO E DO NITROGÊNIO EM PLANTAS DE *Khaya ivorensis* A. Chev.**

RESUMO

O objetivo dessa pesquisa foi avaliar os efeitos do Cd sobre o metabolismo do carbono e do nitrogênio de *Khaya ivorensis* A. Chev e a capacidade do Si para mitigar o estresse causado por esse metal. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 4x4 com cinco repetições, e os fatores constituídos por níveis crescentes do metal pesado (Cd 0, 25, 50 e 75 mg L⁻¹) e doses de silício (Si 0, 100, 150 e 300 mg L⁻¹), os dados obtidos foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e de Levene, realizou-se a análise de variância e com base no nível de significância no teste F (p<0,05), procedeu-se a análise de regressão polinomial. Com o aumento das doses de Cd, um declínio dos açúcares redutores, redutase do nitrato, glutamina sintetase e aminoácidos nas folhas e raízes foi observado. Juntamente com o aumento das doses de Cd, houve um acréscimo do nitrato, amônio, prolina e glicina-betaína nas folhas e raízes. Os carboidratos diminuíram nas folhas e aumentaram nas raízes com o acréscimo das doses Cd. O Si não promoveu respostas satisfatórias no metabolismo da planta, não conseguindo atenuar o estresse por Cd nem na menor dose do metal (Cd 25 mg L⁻¹).

Palavras-chave: toxidez. mogno africano. degradação ambiental.

2.1. Introdução

A degradação ambiental, promovida principalmente pela ação antrópica, tem exercido forte pressão sobre a qualidade dos ecossistemas (PAIVA et al. 2002). Surge a problemática em relação aos recursos naturais, utilizados indiscriminadamente, há séculos, em prol do êxito das atividades econômicas (RODRIGUES & ORLANDELLI, 2018).

O incremento de metais pesados no solo ocorrido nas últimas décadas ocasiona sérios problemas ambientais, principalmente quando ocorrem como consequência de atividades humanas, através da mineração, emissões industriais, uso de fertilizantes e pesticidas na agricultura, além da disposição de resíduos no solo. (CAMARGO, et al. 2001; AUGUSTO et al. 2014).

Os metais pesados são elementos químicos com peso específico maior que 5 g/cm⁻³ ou que possuem número atômico maior que 20 (MARQUES et al. 2002; BERTOLI, 2011). Associado a problemas de poluição (OLIVEIRA, 2008). Em níveis elevados os metais pesados tornam-se perigosos e podem causar efeitos tóxicos ou a morte das plantas (SILVA, 2014).

O Cd é um metal pesado sem função biológica, com alta toxicidade para plantas e animais (DONG et al. 2007). Sendo encontrado no meio ambiente principalmente em práticas agrícolas, pela utilização do fosfato mineral (TIRADO & ALLSO, 2012).

Pela sua toxidez o Cd ao entrar na planta pode causar a desestabilização do aparato fotossintético (DIAS et al. 2013) e modificações na condutância estomática e transpiração foliar (SOUZA et al. 2011; ROY et al. 2016). Causando estresse em muitos processos fisiológicos, incluindo o metabolismo do nitrogênio, fotossíntese, metabolismo de carboidratos, assimilação de minerais e as relações hídricas da planta (GAJDOS et al. 2012).

Devido a sua toxidez os metais pesados interferem prejudicialmente o desenvolvimento de espécies vegetais, o que faz necessário a busca por plantas que apresentem mecanismos de tolerância para serem utilizadas na fitorremediação ambiental. (SOUZA et al. 2013; RODRIGUES et al. 2016).

O mogno africano é de origem africana, pertence à família Meliaceae e possui madeira nobre de grande potencial econômico. No Brasil as regiões Norte e Sudeste são as maiores produtoras (PINHEIRO et al. 2011). O seu plantio começou no estado do Pará, pela Embrapa Amazônia Oriental (CORREIA, 2015; PINHEIRO et al. 2011).

A *K. ivorensis* tem características interessantes por ser uma planta heliófila, porém tolerante a sombra durante a fase jovem (FOLI, 2000; BATISTA, 2010), com crescimento relativamente rápido, apresenta raiz pivotante, com secundárias tabulares (LEMMENS, 2008; VERZIGNASSI et al. 2015), sendo ainda classificada como espécie pioneira ou secundária tardia (BUDOWSKI, 1965; DENSLOW, 1987), regenerando em clareiras abertas na floresta (SWAINE & WHITMORE, 1988; RIBEIRO et al. 2017).

Visando atenuar o estresse em plantas o Si na agricultura é visto como um elemento promissor no desenvolvimento de resistência a diferentes tipos de estresses bióticos e abióticos (LIANG et al. 2015; SAHEBI et al. 2016; ZHU & GONG, 2014).

O efeito benéfico do Si deve-se à manutenção do potencial hídrico foliar, ajuste de osmólitos compatíveis e redução do estresse oxidativo (GONG et al. 2005), preservação de pigmentos fotossintéticos (BOKHTIAR et al. 2012) e aumento na eficiência de uso da água (MING et al. 2012), refletindo no melhor desenvolvimento das plantas submetidas ao estresse (MIAO et al. 2010; CHEN et al. 2016).

Os resultados de Conceição (2019), colaboram com este estudo para um melhor entendimento do comportamento do Cd e Si nos órgãos de mogno africano. Segundo Conceição (2019), o Fator de bioconcentração de Cádmio (Cd), foi maior na dosagem de Cd 25 mg L⁻¹ na raiz, no entanto, na medida em que os níveis de Cd foram aumentados, houve aumento gradual da concentração do íon no tecido foliar. Em relação ao Fator de translocação (FT) e Índice de tolerância (IT) ao Cd, o FT foi menor nas plantas submetidas às concentrações de Cd 50 mg L⁻¹ e suplementadas com Si 150 mg L⁻¹ o que, também, resultou no máximo índice de tolerância das plantas. A Concentração de Silício na matéria seca (MS) foi mínima apenas com a máxima dose de Cd 75 mg L⁻¹ com acúmulos nas raízes.

A hipótese levantada foi se o Cd afetou o metabolismo do mogno africano e se o Si era capaz de mitigar o estresse causado por esse metal em plantas de mogno africano. Então, diante do exposto o objetivo dessa pesquisa foi avaliar os efeitos do Cd sobre o metabolismo do carbono e do nitrogênio de *Khaya ivorensis* A. Chev e a capacidade do Si para mitigar o estresse causado por esse metal.

2.2. Material e métodos:

2.2.2. Local do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Universidade Federal Rural da Amazônica (UFRA), campus Belém/PA, localizada a 01°28'03"S; 48°29'18"W (Figura 1). O clima local é Af, de acordo com a classificação de Köppen. Durante o experimento a temperatura média registrada na casa de vegetação foi de 36 °C e umidade relativa do ar de 90%.

Figura 1. Localização do experimento na UFRA.



Fonte: Autor,2020.

2.2.3. Material vegetal e condições do experimento

O genótipo utilizado neste estudo foi o de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev), as sementes foram provenientes das matrizes localizadas na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Amazônia Oriental), localizada em Belém, Estado do Pará, Brasil (1°26'10,85"S; 48°26'57,29"W).

A sementeira foi realizada e 120 dias após a sementeira (DAS), as plantas de mogno africano moido aproximadamente 60 cm foram transferidas para vasos de Leonard com capacidade de 5-L e adicionada a solução nutritiva de Sarruge (1975) constituída por N 120 mg L⁻¹; P 31 mg L⁻¹; K 234 mg L⁻¹; Ca 200 mg L⁻¹; Mg 48 mg L⁻¹; S 64 mg L⁻¹; B 0,5 mg L⁻¹; Cu 0,02 mg L⁻¹; Fe 5,0 mg L⁻¹; Mn 0,5 mg L⁻¹; Zn 0,05 mg L⁻¹ e Mo 0,01 mg L⁻¹ com ¼ de força iônica. A solução nutritiva foi trocada a cada sete dias ou quando a condutividade elétrica atingiu 70% do seu valor inicial. O pH da

solução foi verificado diariamente e mantido em $5,8 \pm 0,2$, usando HCl ou NaOH na solução para ajuste quando necessário.

As plantas permaneceram sob essas condições por 60 dias. Após esse período, a solução nutritiva foi modificada para 65% da sua concentração original, e as plantas mantidas sob esse tratamento por mais 60 dias para aclimatação e desenvolvimento das raízes.

2.2.4. Concentrações de Cádmio e de silício

Aos 240 DAS, as plantas foram submetidas aos tratamentos de toxidez por metal pesado (MP) e nutricional que consistiram, respectivamente, em concentrações crescentes de cádmio (0; 25; 50 e 75 mg L⁻¹ Cd), usando como fonte o cloreto de cádmio (CdCl₂. 2,5H₂O) (Sigma Aldrich), tomando-se, para isso, como base a Resolução 420 do Conselho Nacional de Meio Ambiente-CONAMA, Brasil, (2009), e de silício (Si) (0; 100; 150 e 300 mg L⁻¹Si) na forma de metassilicato de sódio (Na₂SiO₃). As concentrações do MP e do nutriente foram adicionadas aos vasos contendo solução nutritiva e, cada uma delas correspondeu a um tratamento e, cada um deles, foi composto de cinco repetições. As plantas foram mantidas por 60 dias sob exposição ao Cd e Si.

2.2.5. Avaliações Bioquímicas:

Aos 300 DAS as amostras de raízes e folhas de cada tratamento foram coletadas e reservadas separadamente em sacos de papel e levadas a estufa de ventilação de ar forçada, mantendo-se a temperatura de 65°C por 72h. O material seco foi moído em moinho tipo Wiley equipado com peneira de 0,038mm, até a obtenção de um pó fino e, devidamente armazenado em tubos de falcon, até a sua utilização para a determinação das variáveis bioquímicas. Essas análises foram realizadas no Laboratório de Estudo da Biodiversidade em Plantas Superiores (EBPS), localizado no Instituto de Ciências Agrárias-ICA (UFRA, Belém/PA).

2.2.6. Determinação de Carboidratos Solúveis Totais:

Foi utilizado o método descrito por Dubois, et al. 1956. Transferiu-se 50 mg de massa seca (MS) para tubos de ensaio de 15 mL, adicionar 5 mL de água destilada e levou-se ao banho-maria por 30 min a 100° C; Após a extração as amostras foram

centrifugadas em centrífuga de bancada (1000 rpm) e os sobrenadantes coletados para obtenção do extrato total. Em tubos de ensaio colocou-se 100 μL do sobrenadante (realizar teste de diluição) + 400 μL de H_2O e agitar em vortex. Adicionou-se 0,5 mL de fenol 5% e agitou em vortex. Adicionou-se uniformemente e de uma única vez no centro do tubo (com pipeta graduada) 2,5 mL de H_2SO_4 concentrado. Os tubos foram agitados em vortex e em seguida deixados em repouso de 10 a 20 minutos e então levados para fazer a leitura no espectrofotômetro a 490 nm.

2.2.7. Determinação de Açúcares redutores:

O método empregado é o preconizado por Rinner et al. (2012).

2.2.8. Determinação das concentrações de Nitrato (NO_3^-):

Foram adicionados 100 mg de massa seca do tecido vegetal em tubos de ensaio com rolha de borracha contendo 5 mL de água destilada e colocadas para ferver em banho-maria a 100 °C por 30 minutos. Em seguida, os tubos foram colocados por alguns minutos para resfriar, até atingirem a temperatura ambiente, posteriormente, centrifugados, a 3000 rpm por 10 minutos. O sobrenadante foi coletado em tubo de ensaio e o precipitado foi ressuspensionado com outros 5 mL de água destilada, sendo repetido o procedimento da extração anterior. Em seguida, os extratos foram coletados em um tubo de ensaio graduado e o volume foi completado com água destilada até atingir 10 mL.

O método utilizado foi o de Cataldo et al. (1975), sendo os valores das alíquotas reduzidos para $\frac{1}{4}$ dos mencionados por esses autores. A reação foi preparada em tubo de ensaio, contendo 100 μL do extrato e 200 μL de solução de ácido salicílico 5% (p/v), marca Sigma, em ácido sulfúrico concentrado p.a. (Merck). Após agitação, em agitador de tubos tipo vortex. Esses tubos foram deixados à temperatura ambiente, por 20 minutos. Em seguida, lentamente, 4700 μL de NaOH 2M foram adicionados sob agitação para atingir o pH acima de 12. Após repouso à temperatura ambiente durante 15 minutos, as leituras foram feitas em espectrofotômetro a 410nm, usando água destilada + reagentes, como branco. A concentração de NO_3^- foi determinada a partir da curva padrão com KNO_3 p.a (Sigma) e os resultados foram expressos em $\text{mmoles de NO}_3^- \cdot \text{g}^{-1}$ MS de tecido.

2.2.9. Determinação da Redutase do Nitrato (RN):

Foi utilizado o método de Hageman & Hucklesby (1971). Foram pesados, aproximadamente, 200 mg de discos de raízes e folhas de 0,5 cm de diâmetro. As amostras foram colocadas em tubos de ensaio, contendo 5 mL do tampão fosfato 0,1 M, pH=7,5; contendo isopropanol 1% (v/v), KNO₃ Mm e estes cobertos com papel alumínio (tratamento escuro). Em seguida, os tubos foram evacuados com o auxílio de uma bomba de vácuo, durante 2 minutos. Após, os tubos foram colocados em banho-maria a 30 °C, por 30 minutos, na ausência de luz. Em tubos de ensaio tipo pirex, foram adicionadas alíquotas de 1 mL de tampão fosfato + 2 mL do extrato diluído + 1,0 mL de sulfanilamida 1% + 1,0 mL de N-1-naftiletilenodiamina dicloridrato (NNEDA) 0,02%, totalizando um volume final de 5 mL. Em seguida, os tubos foram deixados em repouso por 15 minutos. A leitura foi no espectrofotômetro à 540 nm contra o branco (3,0mL de tampão fosfato + 1,0 mL de sulfanilamida 1% + 1,0 mL de NNEDA, 0,02 %). O resultado da atividade da redutase do nitrato foi estimado através da produção de NO₂⁻ no meio de reação, sendo expressa em µmoles de NO₂⁻. g⁻¹MS, a partir de uma curva-padrão obtida com KNO₂ p.a (Sigma).

2.2.10. Determinação das concentrações de Amônio Livre:

O método utilizado foi o de Weatherburn (1967). Foram utilizados 50 mg de massa seca (MS) em tubos de ensaio de 15 mL, adicionando-se 5 mL de água destilada e levados ao banho-maria por 30 min a 100° C. Após a extração as amostras foram centrifugadas em centrífuga de bancada (1000 rpm) e os sobrenadantes coletados para obtenção do extrato total. Em tubos de ensaio foi acrescentado 400 µL de extrato total + 2,5 mL da solução A (5 g de fenol + 0,025 g de nitroprussiato de sódio/ 500 mL de água destilada) e agitado em vortex e acrescentando mais 2,5 mL da solução B (2,5 g de NaOH + 12,6 mL de hipoclorito de sódio/ 500 mL de água destilada) e agitados novamente em vortex, levando os mesmo tubos ao banho-maria por 20 min a 37° C. Após removidos os tubos do banho-maria foram deixados em repouso por 40 min e levados para fazer a leitura no espectrofotômetro a 625 nm e usando-se água destilada (em substituição ao extrato) + reagentes como branco. As concentrações de amônio livre foram estimadas a partir da curva-padrão construída com (NH₄)₂SO₄ p.a (Sigma). Os resultados foram expressos em mmol de NH₄⁺. Kg⁻¹ de MS.

2.2.11. Determinação da Atividade da Glutamina Sintetase (GS):

A massa seca dos tecidos vegetais foram maceradas em almofariz resfriados com nitrogênio líquido (- 196° C). Adicionou-se 0,2 mg de folhas da massa seca moída em 5 mL da mistura (2mL + 2 mL + 1mL/ 2 minutos cada) de tampão de extração TRIS-HCl 25 mM, pH=7,6, contendo: 10 mM de MgCl₂. 6 H₂O + 10 mM de β-2-mercaptoetanol + P.V.P. 5% (p/v) + 5 mM de EDTA-Na. Após trituradas, foram filtradas em pano fino de seda e centrifugadas à 30.000 g (21.000 rpm), em centrífuga refrigerada à 0° - 4° C, por 30 minutos.

A atividade de GS foi determinada pelo método de Kamachi et al. (1991). A reação foi preparada, em tubo de ensaio, com 600 µL de tampão de reação TRIS-HCl 0,25 M, pH=7 + 200 µL de glutamato de sódio 0,3 M, pH=7 + 200 µL de ATP 30 mM, pH=7 + 200 µL de Mg SO₄. 7 H₂O 0,5 M + 500 µL de extrato de folhas + 200 µL de solução de hidroxilamina (NH₂ OH 1,0 M + NaOH 1,0 M, na proporção 1:1). Após, misturados rigorosamente, em agitador de tubos, tipo vortex e incubados em “banho-maria”, à 30 ° C, por 30 minutos. Em seguida, retiraram-se os tubos do “banho-maria” e adicionaram-se 500 µL de solução férrica [FeCl₃. 6 H₂O 10 % (p/v) em HCl 0,2 M + ácido tricloroacético (T.C.A.) 24 % (p/v) + HCl 50 % (v/v), na proporção 1:1:1]. Centrifugou-se, em centrífuga de mesa a 7.000 g, por 10 minutos. A leitura foi feita em espectrofotômetro à 540 nm, usando-se água “milli-Q + reagentes (exceto solução de hidroxilamina), como branco. A atividade da glutamina sintetase (GS), foi determinada a partir da curva padrão de γ-glutamil-hidroximato e os resultados foram expressos mmoles de γ-glutamil-hidroximato / kg MS.

2.2.12. Determinação de Aminoácidos:

Foi utilizado o método descrito por Yemm & Cocking, (1955) Em tubos de ensaio foram adicionados: 500 µL do extrato devidamente diluído em água, 250 µL do tampão citrato 0,2M, 500 µL do KCN 0,2 mM e 100 µL de ninhidrina a 5%. Os tubos de ensaio foram tampados, agitados e depois colocados em banho-maria, por 20 minutos, a 100°C; Após este tempo a reação foi interrompida por resfriamento dos tubos em banho de gelo; em seguida, foi adicionado 650 µL de etanol 60% para a fixação da cor desenvolvida (violeta), a qual fica estável em 3 horas. A leitura foi realizada em espectrofotômetro à 570 nm; os cálculos da concentração de aminoácidos

tiveram, como referência, a equação obtida para a curva padrão, expressos em μmol aminoácidos. g^{-1} MS.

2.2.13. Determinação das concentrações de Prolina:

Foi utilizado o método descrito por Bates et al. 1973. Transferiu-se 50 mg de massa seca (MS) para tubos de ensaio de 15 mL, adicionou-se 5 mL de água destilada e levou-se ao banho-maria por 30 min a 100°C . Após a extração, as amostras foram centrifugadas em centrífuga de bancada (1000 rpm) e os sobrenadantes coletados para obtenção do extrato total. Em tubos de ensaio foram colocados 1,0 mL do sobrenadante + 1,0 mL de ninhidrina ácida + 1,0 mL de ácido acético glacial (os tubos foram fechados hermeticamente); agitou-se os tubos hermeticamente fechados em vortex. Colocou-se em banho-maria a 100°C por 1 hora. Após 1 hora, interrompeu-se a reação em banho de gelo. Adicionou-se 2,0 mL de tolueno e agitar vigorosamente em vortex por 20 segundos (o tolueno extrai a substância cromófora formando um complexo colorido = róseo para vermelho). Esperou-se atingir a temperatura ambiente. Aspirou-se com o auxílio de uma pipeta Pasteur de plástico a fase não-aquosa (cromóforo + tolueno = parte superior). A leitura foi feita em espectrofotômetro a 520 nm usando tolueno como branco. Os resultados foram expressos em $\mu\text{mol PRO.g}^{-1}$ MS.

2.2.14. Determinação das concentrações de Glicina-betáina:

Foi utilizado o método descrito por Grieve e Grattan (1983). Transferiu-se 25 mg de massa seca (MS) em estufa para tubos eppendorfs de 2 mL, adicionou-se 2 mL de água destilada e agitou-se por 4 h no shacker a 25°C (extração a frio); Centrifugou-se a 10.000 rpm por 10 min a 25°C ; Após a centrifugação coletou-se o sobrenadante para obtenção do extrato aquoso e depois descartou-se o precipitado. Em eppendorfs de 2 mL adicionou-se 250 μL do extrato aquoso + 250 μL de H_2SO_4 2N (diluição da amostra 1:2); Os eppendorfs permaneceram durante 1h no banho de gelo (na geladeira - de 0°C a 4°C); Em seguida, adicionou-se 200 μL de KI-I_2 gelado; Foram mantidos durante 16h a 0°C (banho de gelo na geladeira - 0°C a 4°C); Centrifugados durante 15 min, 10.000 rpm, 0°C . Descartou-se o sobrenadante; Lavou-se o precipitado 2 vezes com 2 mL de H_2SO_4 1N gelado com centrifugações por 5 min, 10.000 rpm, 0°C a cada lavagem (não agitou-se durante a lavagem); Após as lavagens, dissolveu-se o precipitado em 3 mL de 1,2- dicloroetano agitando vigorosamente; Realizou-se diluições 1:6 (diluição para a

curva) e testou-se outras maiores (1:12, 1:24 ou 1:48 para as amostras - a diluição dependeu da quantidade de glicina-betaína precipitada); Após 2 a 2,5 h de descanso, realizou-se a leitura em espectrofotômetro a 365 nm. Durante todo o ensaio mantiveram-se as amostras entre as temperaturas de 0°C a 4°C. Os resultados foram expressos µg de glicina betaína/g MS.

2.2.15. Delineamento experimental e análise estatística:

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 4x4 com cinco repetições, sendo os fatores constituídos por níveis crescentes do metal pesado (Cd a 0, 25, 50 e 75 mgL⁻¹) e doses de silício (Si a 0, 100, 150 e 300 mgL⁻¹), totalizando 80 unidades experimentais. Os dados experimentais foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e de Levene à 1% de probabilidade, para verificação da normalidade e homocedasticidade residuais. Atendidas as pressuposições básicas, realizou-se a análise de variância, e com base no nível de significância no teste F (p<0,05) para as concentrações de Cd e Si, procedeu-se a análise de regressão polinomial (superfície de resposta), utilizando o software Statistica 7.0 (Statsoft, 2007).

2.3. Resultados e Discussão

Carboidratos Solúveis Totais e Açúcares Redutores

As concentrações de carboidratos solúveis totais (CSTs) em folha (Figura 2a) reduziram à medida que a concentração de Cd aumentou quando comparado ao controle (3,03 mmol de Glu.g⁻¹ MS), enquanto que na raiz (Figura 2b) houve um aumento dos CSTs à medida que a concentração de Cd aumentou quando comparado ao controle (1,22 mmol de Glu.g⁻¹ MS). O CSTs atingiu o valor mínimo de 1,13 mmol de Glu.g⁻¹ MS no tecido foliar (Figura 2a) na dosagem Cd 75 mg L⁻¹, e no tecido radicular (Figura 2b) atingiu o valor máximo de 2,46 mmol de Glu.g⁻¹ MS na dosagem Cd 50 mg L⁻¹.

Em relação a interação, com o aumento das concentrações de Si os CSTs aumentaram na folha (Figura 2a) sendo encontrado o valor máximo de 3,23 mmol de Glu.g⁻¹ MS no tratamento Cd 75 mg L⁻¹ x Si 300 mg L⁻¹, enquanto que na raiz (Figura 2b) houve redução apresentando no tratamento Cd 75 mg L⁻¹ x Si 150 mg L⁻¹ o valor mínimo de 0,88 mmol de Glu.g⁻¹ MS.

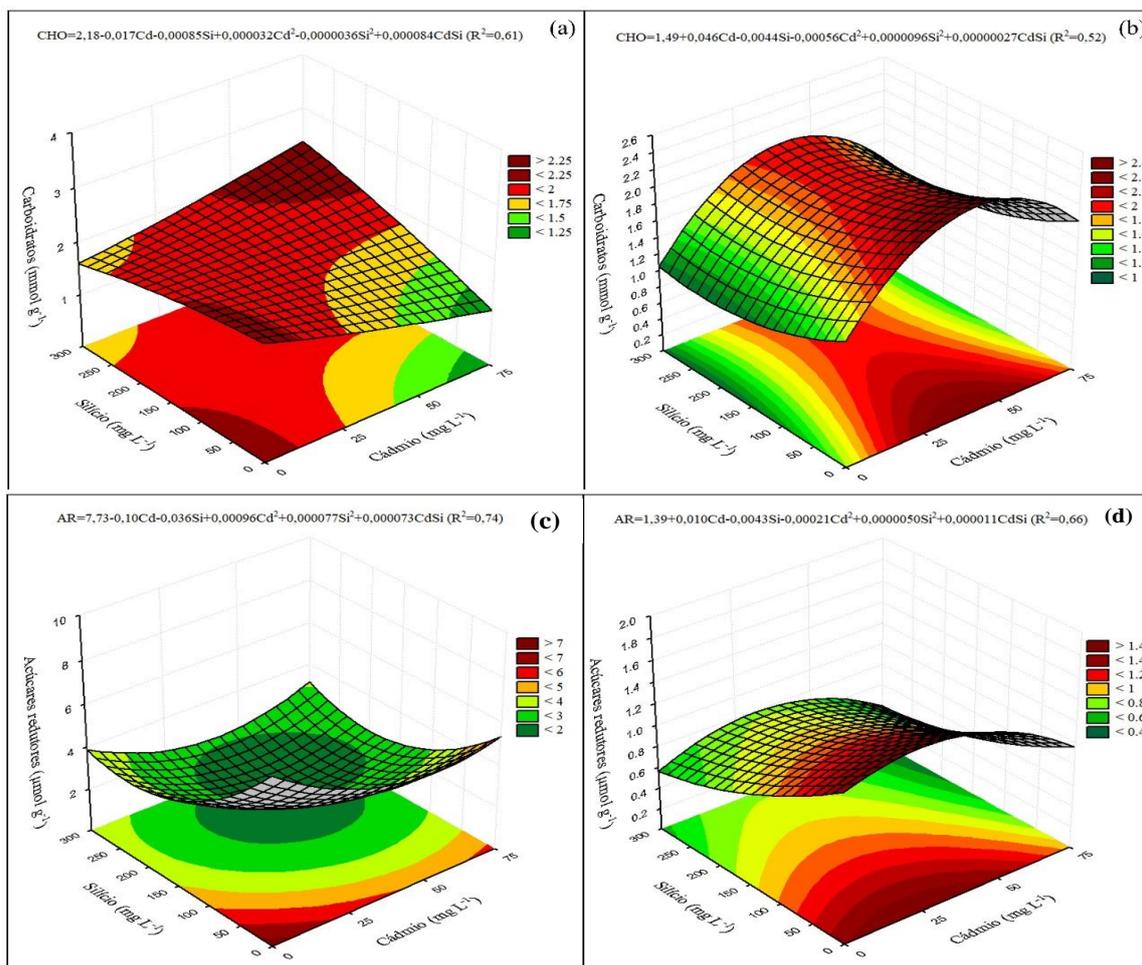
De acordo com Costa (2012), dependendo da espécie os teores de carboidratos solúveis podem aumentar ou diminuir de acordo com o estresse, pois os mesmos

apresentam papel crucial na regulação do metabolismo energético: fotossíntese e respiração.

A interferência no metabolismo de carboidratos é uma resposta comum de plantas na presença de diferentes metais pesados (ZHAO et al. 2011; WANG et al. 2012). Algumas enzimas contribuem para diminuição desses compostos como a enolase e fosfoglicomutase, justificando a diminuição na folha. Enquanto outras enzimas contribuem para o aumento desse composto a exemplo da triose fosfato isomerase e gliceraldeído 3-fosfato desidrogenase, justificando o aumento na raiz (NOGUEIRA, 2018).

Resultados semelhantes foram encontrados por Tabuchi et al. (2004), que trabalhando com trigo constatou um acúmulo de carboidratos na raiz, segundo ele para contribuir em uma menor inibição do crescimento radicular em plantas.

Figura 2. Carboidratos Solúveis Totais em folha (a) e raiz (b), Açúcares Redutores em folha (c) e raiz (d) em plantas jovens de *K. ivorensis* A. Chev cultivadas em solução nutritiva, em função de concentrações crescentes de cádmio Cd e de Si.



Os açúcares redutores em folha (Figura 2c) e raiz (Figura 2d) apresentaram uma redução à medida que a concentração de Cd aumentou, atingindo na dosagem Cd 75 mg L⁻¹ o valor de 5,89 μmol de carboidrato.g⁻¹ MS no tecido foliar (Figura 2c) onde o controle na folha era (8,30 μmol de carboidrato.g⁻¹ MS), e na dosagem Cd 75 mg L⁻¹ o valor de 1,21 μmol de carboidrato.g⁻¹ MS no tecido radicular (Figura 2d) onde o controle na raiz era (1,32 μmol de carboidrato.g⁻¹ MS).

Em relação a interação, com o aumento das concentrações de Si os açúcares redutores diminuíram na folha (Figura 2c) e na raiz (Figura 2d), sendo encontrado o valor mínimo de 1,94 μmol de carboidrato.g⁻¹ MS no tratamento Cd 50 mg L⁻¹ x Si 150 mg L⁻¹ do tecido foliar (Figura 2c), enquanto que na raiz (Figura 2d) o tratamento Cd 75 mg L⁻¹ x Si 300 mg L⁻¹ apresentou o valor mínimo de 0,60 μmol de carboidrato.g⁻¹ MS.

Os açúcares redutores fazem parte dos açúcares não estruturais cujos teores são sensíveis as variações ambientais e injúrias sofridas pelas plantas. São açúcares utilizados para avaliar as respostas das plantas às condições de estresse (BENNETT et al. 2005; SOUZA et al. 2013).

As baixas concentrações de açúcares redutores se devem provavelmente ao efeito inibitório do cádmio no crescimento e atividades metabólicas das raízes, isso é atribuído provavelmente à redução da mitose, danos no aparelho de Golgi, a síntese reduzida de componentes de parede celular e alterações no metabolismo de açúcares (FERREIRA, 2013).

Os resultados deste trabalho diferem com o de Verma S. & Dubey (2001) que trabalhando com arroz teve um aumento do teor de açúcar induzido pelo Cd.

Nitrato e Redutase do Nitrato

As concentrações de nitrato em folha (Figura 3a) e raiz (Figura 3b) apresentaram um acréscimo à medida que a concentração de Cd aumentou, atingindo na dosagem Cd 75 mg L⁻¹ o valor máximo de 0,054 μmol de NO₃⁻.g⁻¹ MS no tecido foliar (Figura 3a) onde o controle na folha era (0,02 μmol de NO₃⁻.g⁻¹ MS), e o valor máximo de 0,084 μmol de NO₃⁻.g⁻¹ MS no tecido radicular (Figura 3b) onde o controle na raiz era (0,057 μmol de NO₃⁻.g⁻¹ MS).

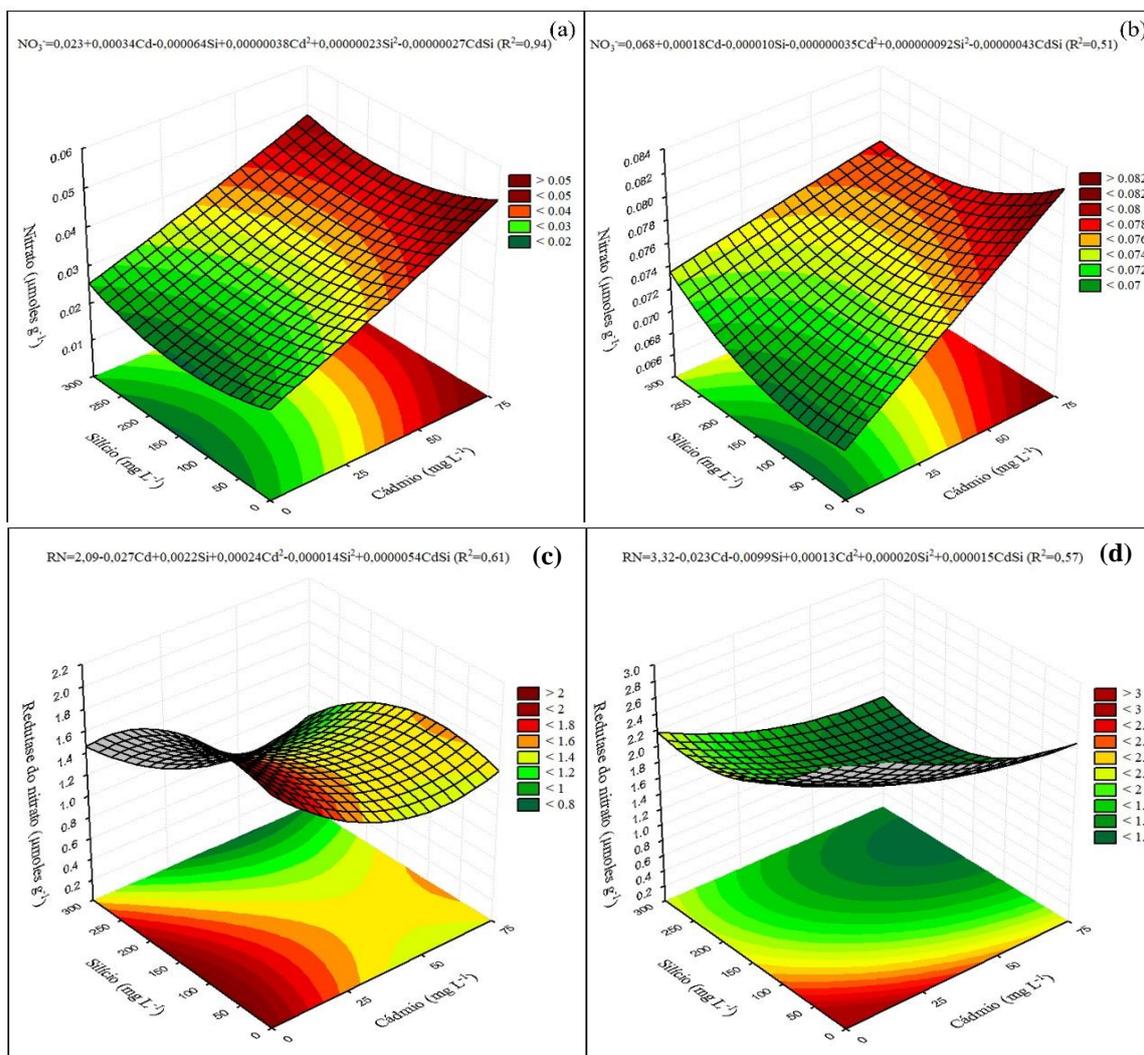
Em relação a interação, com o aumento das concentrações de Si o nitrato aumentou na folha (Figura 3a) e na raiz (Figura 3b), sendo encontrado o valor de 0,048 μmol de NO₃⁻.g⁻¹ MS no tratamento Cd 75 mg L⁻¹ x Si 300 mg L⁻¹ do tecido foliar

(Figura 3a), e na raiz (Figura 3b) o tratamento Cd 75 mg L⁻¹ x Si 300 mg L⁻¹ apresentou o valor de 0,082 μmol de NO₃⁻.g⁻¹ MS.

Esse aumento é considerado normal em virtude do nitrato (NO₃⁻) ser uma das principais formas de entrada de nitrogênio nas plantas, uma vez assimilado pelas raízes pode ser reduzido no citosol das mesmas e armazenado no vacúolo, isso justifica o aumento nas concentrações (BREDEMEIER & MUNDSTOCK, 2000). Contudo, esse nitrato (NO₃⁻) pode ser transportado via xilema para as folhas onde será reduzido no citosol e podendo ser armazenado nesse compartimento (BALOTF et al., 2012). Em situação de excesso de metais pesados, caso observado nesse estudo, plantas modificam o fluxo normal de NO₃⁻ de modo a estocar esse íon em órgãos fortemente afetado pelo metal (LI et al. 2010, ZHANG et al. 2014).

Resultados semelhantes foram encontrados por Hatamian et al. (2020), trabalhando com mudas de hackberry que teve as características de crescimento influenciadas positivamente pela aplicação de nitrato, mesmo em altas doses de cádmio, considerando esta árvore ornamental uma espécie tolerante a altos níveis de Cd no solo.

Figura 3. Nitrato em folha (a) e raiz (b), Redutase do Nitrato em folha (c) e raiz (d) em plantas jovens de *K. ivorensis* A. Chev cultivadas em solução nutritiva, em função de concentrações crescentes de cádmio Cd e de Si.



A redutase do nitrato apresentou em folha (Figura 3c) e raiz (Figura 3d) uma redução à medida que a concentração de Cd aumentou, atingindo na dosagem Cd 50 mg L⁻¹ o valor de 1,21 μmol de NO₂⁻ · g⁻¹MS no tecido foliar (Figura 3c) onde o controle na folha era (2,18 μmol de NO₂⁻ · g⁻¹MS), e na dosagem 75 mg L⁻¹ o valor de 2,15 μmol de NO₂⁻ · g⁻¹MS no tecido radicular (Figura 3d) onde o controle na raiz era (3,76 μmol de NO₂⁻ · g⁻¹MS).

Em relação a interação, com o aumento das concentrações de Si a redutase do nitrato diminui na folha (Figura 3c) e raiz (Figura 3d), sendo encontrado o valor mínimo de 0,41 μmol de NO₂⁻ · g⁻¹MS no tratamento Cd 50 mg L⁻¹ x Si 300 mg L⁻¹ do tecido foliar (Figura 3c), enquanto que na raiz (Figura 3d) o tratamento Cd 75 mg L⁻¹ x Si 150 mg L⁻¹ apresentou o valor mínimo de 0,94 μmol de NO₂⁻ · g⁻¹MS.

Sob estresses abióticos, a enzima RN pode atuar como importante biomarcador da tolerância de plantas a metais fitotóxicos uma vez que sob estresse por cádmio, os vegetais tendem a diminuir a produção desta enzima, principalmente (SINGH et al.

2015). Outro fato que explica essas respostas dessa baixa atividade enzimática, está na dependência dessa enzima nitrato redutase (RN) da energia proveniente da fotossíntese [nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato oxidase [NAD(P)H] que pode ter sido afetada pelas altas concentrações de cádmio, desta forma, o bom status fisiológico da planta repercute no aumento da atividade da enzima (MARSCHNER, 2012).

Gouia et al. (2000) constatou em seu trabalho, que o tratamento com Cd induz mudanças rápidas e de longo prazo na atividade da redutase do nitrato, em parte em resposta à redução da absorção de água e nutrientes. Além disso, também mostrou que o próprio Cd pode ter um efeito direto nas atividades dessas enzimas.

Amônio e Glutamina Sintetase

O amônio apresentou em folha (Figura 4a) e raiz (Figura 4b) um acréscimo á medida que a concentração de Cd aumentou, atingindo na dosagem Cd 75 mg L⁻¹ o valor máximo de 12,67 mmol de NH₄⁺. Kg⁻¹ de MS no tecido foliar (Figura 4a) onde o controle na folha era (6,3 mmol de NH₄⁺. Kg⁻¹ de MS), e o valor de máximo de 20,89 mmol de NH₄⁺. Kg⁻¹ de MS no tecido radicular (Figura 4b) onde o controle na raiz era (10,03mmol de NH₄⁺. Kg⁻¹ de MS).

Em relação a interação, com o aumento das concentrações de Si o amônio diminui na folha (Figura 4a) e na raiz (Figura 4b), sendo encontrado o valor mínimo de 2,79 mmol de NH₄⁺. Kg⁻¹ de MS no tratamento Cd 75 mg L⁻¹ x Si 150 mg L⁻¹ do tecido foliar (Figura 4a), enquanto que na raiz (Figura 4b) o tratamento Cd 25 mg L⁻¹ x Si 300 mg L⁻¹ apresentou o valor mínimo de 2,85 mmol de NH₄⁺. Kg⁻¹ de MS.

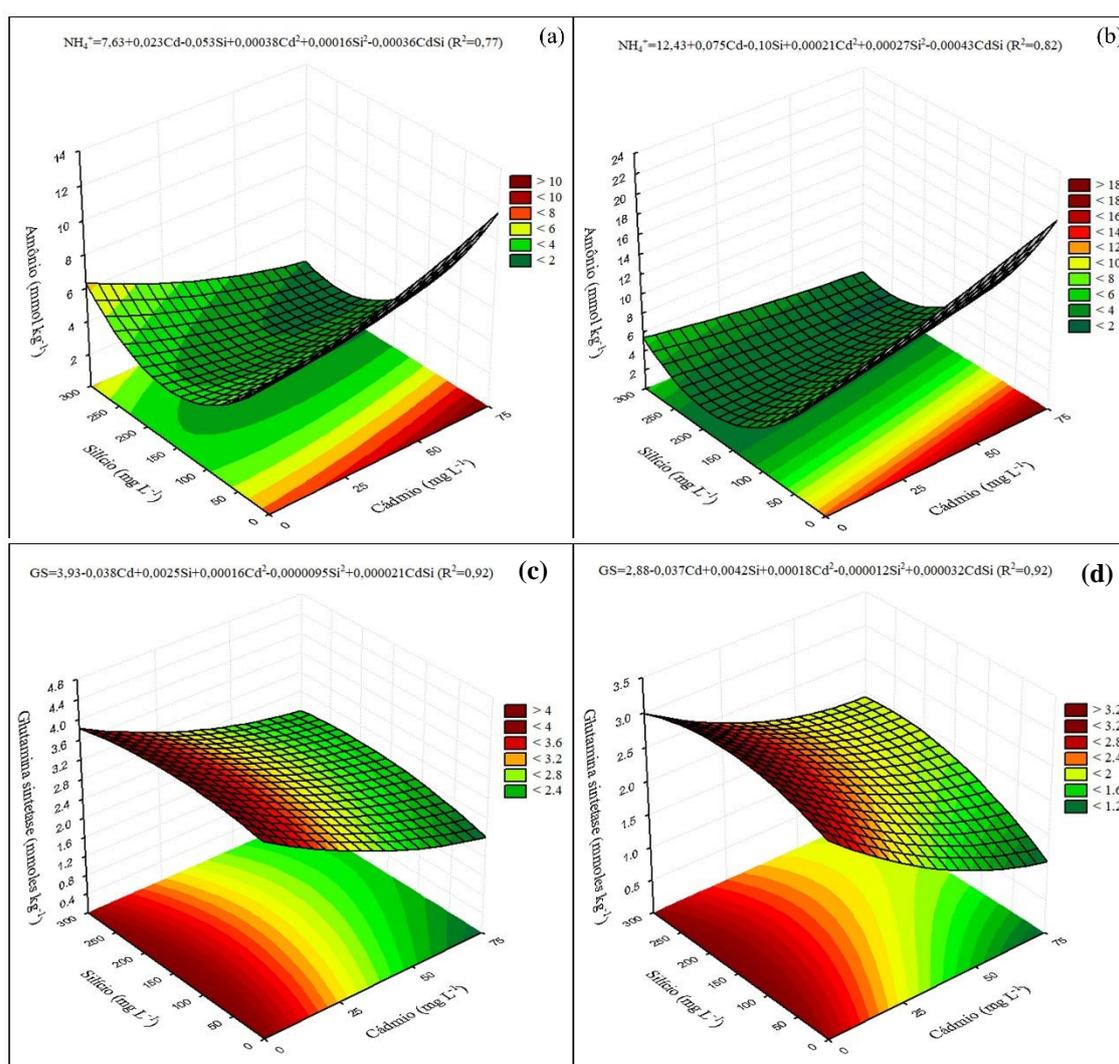
O acúmulo de amônio pode ser atribuído à sua absorção direta, redução do nitrato, desaminação de compostos nitrogenados, pelo ciclofotorrespiratório ou pela fixação biológica (MACDUFF; JACKSON, 1991; BRITTO, 2001; LIMA et al. 2015).

Esse acréscimo da concentração de amônio, se deve a ação do cádmio que provavelmente pode estar relacionada com a ação da enzima glutamina sintetase (GS) que ocorre como uma isoforma isolada em plastídios (GS2) e isoformas localizadas no citosol (GS1) (SWARBRECK et al. 2011). A GS1 citossólica é muito importante em raízes, principalmente na assimilação primária de amônio (NH₄⁺), e também para reassimilação e reciclagem do amônio (NH₄⁺) que é gerado durante a degradação da proteína em folhas ou em processos catabólicos. Enquanto que o papel principal atribuído da GS2 está na reassimilação do amônio (NH₄⁺) oriunda da fotorespiração nos

cloroplastos e assimilação do amônio (NH_4^+) derivada da redução de nitrato (NO_3^-) nos plastídios (THOMSEN et al. 2014).

Cheng, Miaomiao et al. (2016) em seu trabalho concluiu que o aumento de NH_4^+ levou acúmulo de Cd na parte aérea, aumentando a absorção e translocação, em vez de alterar a especiação de Cd, e é uma abordagem potencialmente eficaz para aumentar a fitoextração de Cd.

Figura 4. Amônio em folha (a) e raiz (b), Glutamina Sintetase em folha (c) e raiz (d) em plantas jovens de *K. ivorensis* A. Chev cultivadas em solução nutritiva, em função de concentrações crescentes de cádmio Cd e de Si.



A glutamina sintetase (GS) em folha (Figura 4c) e raiz (Figura 4d) apresentou uma diminuição à medida que a concentração de Cd aumentou, atingindo na dosagem Cd 75 mg L^{-1} o valor mínimo de $2,06 \text{ mmoles de } \gamma\text{-glutamil-hidroximato.kg}^{-1} \text{ MS}$ no tecido foliar (Figura 4c) onde o controle na folha era $4,02 \text{ mmoles de } \gamma\text{-glutamil-}$

hidroximato.kg⁻¹ MS), e o valor mínimo de 1,14 mmoles .kg⁻¹ MS no tecido radicular (Figura 4d) onde o controle na raiz era (3,13 mmoles de γ -glutamil-hidroximato.kg⁻¹ MS).

Em relação a interação, o aumento das concentrações de Si levou a uma redução da GS na folha (Figura 4c) e na raiz (Figura 4d), sendo encontrado o valor de 2,38 mmoles .kg⁻¹ MS no tratamento Cd 75 mg L⁻¹ x Si 300 mg L⁻¹ do tecido foliar (Figura 4c), enquanto que na raiz (Figura 4d) o tratamento Cd 75 mg L⁻¹ x Si 300 mg L⁻¹ apresentou o valor de 1,76 mmoles .kg⁻¹ MS.

Possivelmente, a redução da atividade dessa enzima está relacionada com a diminuição da fotossíntese, devido às baixas concentrações de ATP no meio celular, haja vista que essa enzima é altamente dependente de energia na forma de ATP, gerado pelos fotossistemas na fase fotoquímica da fotossíntese (ALVES, 2010). Pois no metabolismo do nitrogênio a enzima GS catalisa a conversão do aminoácido glutamato em glutamina por meio da reação que envolve a participação de glutamato, amônio, ATP (MCNALLY et al. 1983). Segundo Edwards e Coruzzi (1989) uma das formas da GS, é induzida pela luz e participa no processo de utilização do NH₄⁺ na fotorrespiração.

Segundo Chaffei et al. (2004) trabalhando com tomateiros expostos à toxicidade do Cd pela introdução de doses crescentes desse poluente no meio de cultura, detectou uma diminuição na atividade da GS.

Aminoácidos, Prolina e Glicina-Betaína

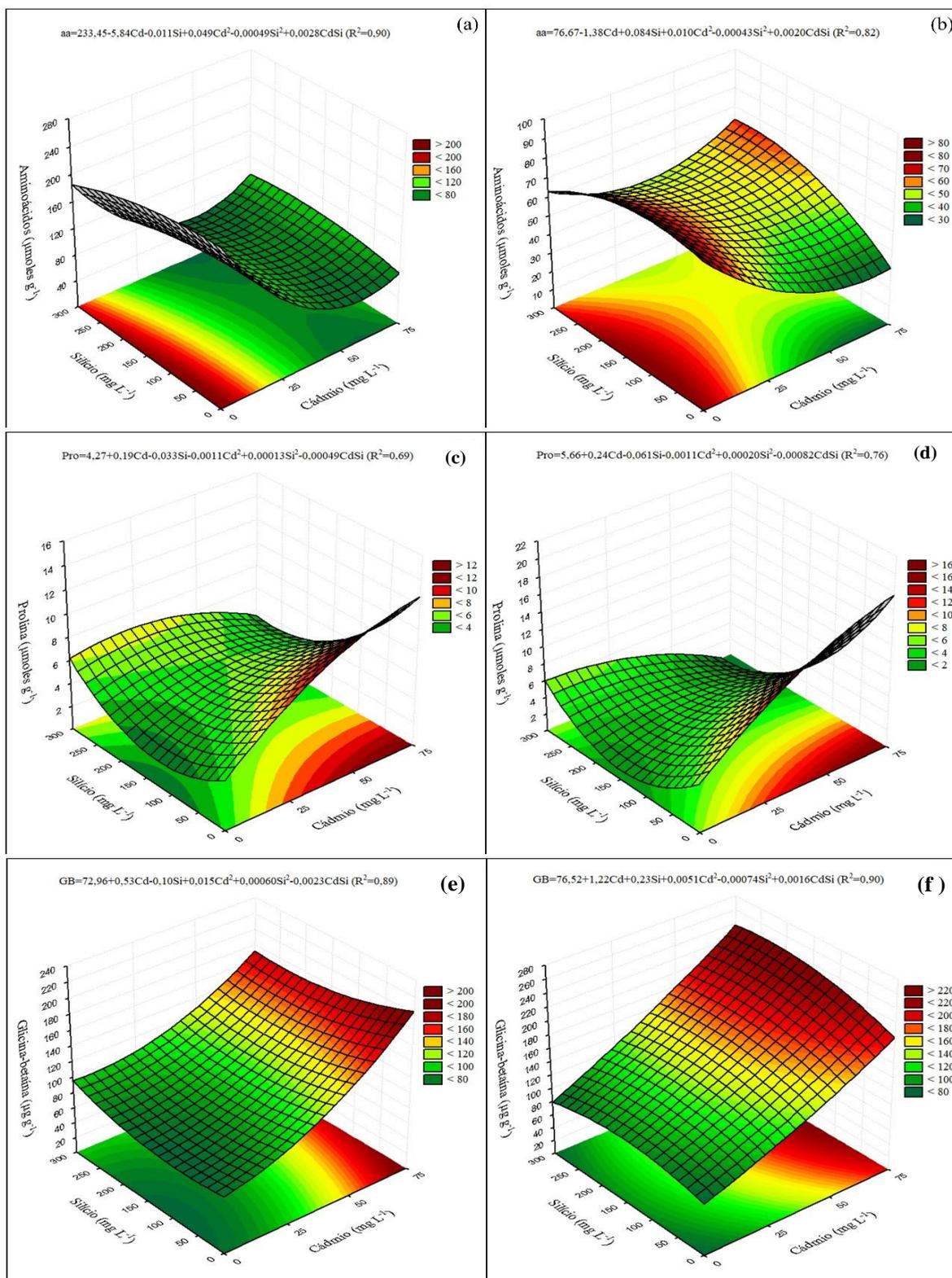
Os aminoácidos na folha (Figura 5a) e raiz (Figura 5b) apresentaram uma diminuição à medida que a concentração de Cd aumentou, atingindo na dosagem Cd 75 mg L⁻¹ o valor mínimo de 67,52 μ mol aminoácidos. g⁻¹ MS no tecido foliar (Figura 5a) onde o controle na folha era (243,27 μ mol aminoácidos. g⁻¹ MS), e o valor mínimo de 27,42 μ mol aminoácidos. g⁻¹ MS no tecido radicular (Figura 5b) onde o controle na raiz era (84,04 μ mol aminoácidos. g⁻¹ MS).

Em relação a interação, com o aumento das concentrações de Si os aminoácidos diminuíram na folha (Figura 5a) e na raiz (Figura 5b), sendo encontrado o valor de 44,51 μ mol aminoácidos. g⁻¹ MS no tratamento Cd 50 mg L⁻¹ x Si 100 mg L⁻¹ do tecido foliar (Figura 5a), enquanto que na raiz (Figura 5b) o tratamento Cd 50 mg L⁻¹ x Si 100 mg L⁻¹ apresentou o valor de 44,50 μ mol aminoácidos. g⁻¹ MS.

O efeito do cádmio foi agressivo diminuindo a concentração desse soluto, isso se deve a sua alta reatividade com esses aminoácidos, essa reatividade ocorre principalmente em átomos de N presente nesses aminoácidos (NOGUEIRA, 2018).

No trabalho de Zemanová, Veronika et al. (2017), o estresse por Cd aumentou o conteúdo de aminoácidos em espécies de *Noccaea*, mas este aumento foi significativo apenas em *N. caerulescens* folhas.

Figura 5. Aminoácidos em folha (a) e raiz (b), Prolina em folha (c) e raiz (d), Glicina Betaina em folha (e) e raiz (f) em plantas jovens de *K. ivorensis* A. Chev cultivadas em solução nutritiva, em função de concentrações crescentes de cádmio Cd e de Si.



A prolina na folha (Figura 5c) e raiz (Figura 5d) apresentou um acréscimo á medida que a concentração de Cd aumentou, atingindo na dosagem Cd 75 mg L^{-1} o valor máximo de $14,46 \mu\text{mol PRO.g}^{-1} \text{ MS}$ no tecido foliar (Figura 5c) onde o controle

na folha era (4,01 $\mu\text{mol PRO.g}^{-1}\text{ MS}$), e o valor máximo de 18,81 $\mu\text{mol PRO.g}^{-1}\text{ MS}$ no tecido radicular (Figura 5d) onde o controle na raiz era (6,32 $\mu\text{mol PRO.g}^{-1}\text{ MS}$).

Em relação a interação, com o aumento das concentrações de Si houve uma diminuição da prolina na folha (Figura 5c) e na raiz (Figura 5d), sendo encontrado o valor de 3,96 $\mu\text{mol PRO.g}^{-1}\text{ MS}$ no tratamento Cd 75 mg L^{-1} x Si 300 mg L^{-1} do tecido foliar (Figura 5c), enquanto que na raiz (Figura 5d) o tratamento Cd 75 mg L^{-1} x Si 300 mg L^{-1} apresentou o valor mínimo de 1,60 $\mu\text{mol PRO.g}^{-1}\text{ MS}$.

A concentração de glicina-betaína na folha (Figura 5e) e raiz (Figura 5f) apresentou um acréscimo á medida que a concentração de Cd aumentou, atingindo na dosagem Cd 75 mg L^{-1} o valor máximo de 209,70 $\mu\text{g de glicina betaína. g}^{-1}\text{ MS}$ no tecido foliar (Figura 5e) onde o controle na folha era (49,37 $\mu\text{g de glicina betaína. g}^{-1}\text{ MS}$), e o valor de 179,10 $\mu\text{g de glicina betaína. g}^{-1}\text{ MS}$ no tecido radicular (Figura 5f) onde o controle na raiz era (74,69 $\mu\text{g de glicina betaína. g}^{-1}\text{ MS}$).

Em relação a interação, com o aumento das concentrações de Si houve um acréscimo da glicina-betaína na folha (Figura 5e) e na raiz (Figura 5f), sendo encontrado o valor de 189,67 $\mu\text{g de glicina betaína. g}^{-1}\text{ MS}$ no tratamento Cd 75 mg L^{-1} x Si 300 mg L^{-1} do tecido foliar (Figura 5e), enquanto que na raiz (Figura 5f) o tratamento Cd 75 mg L^{-1} x Si 300 mg L^{-1} apresentou o valor máximo de 230,15 $\mu\text{g de glicina betaína. g}^{-1}\text{ MS}$.

Segundo Ahmad et al. (2015) a prolina é conhecida por ser acumulada e atuar como um osmoprotetor e antioxidante para proteger as plantas sob vários estresses ambientais. O teor de prolina tende a acumular em células vegetais submetidas à estresse, para ser usada como energia após o fim do estado que se encontra, com a redistribuição de nitrogênio e carbono, para a recuperação de atividades fisiológicas na planta (SOUSA, 2018). A maior concentração de prolina acontece pela sua biossíntese e acúmulo no vacúolo ou no citosol, com função osmoprotetora preservando a integridade celular das proteínas, enzimas e membranas (FAROOQ et al. 2009; ABDUL JALEEL et al. 2007).

A glicina é abundante nos cloroplastos e participa no ajuste e na proteção das membranas dos tilacoides para procurar manter a eficiência fotoquímica na fotossíntese (CHEN; MURATA, 2011). Para D'SOUZA; DEVARAJ (2010) o acúmulo de glicina-betaína normalmente ocorre nas espécies tolerantes do que em espécies sensíveis. Segundo Ashraf et al., (2007) no seu trabalho verifica os diferentes papéis da glicina betaína e prolina na melhoria da resistência ao estresse abiótico das plantas.

No presente estudo, o Si não promoveu respostas satisfatórias no metabolismo da planta, não conseguindo atenuar o estresse por Cd. Embora o Si seja um elemento benéfico, a aplicação do nutriente pode causar um desequilíbrio nutricional e afetar as diversas atividades metabólicas nas plantas (ARAÚJO et al. 2011). Gu et al. (2011), sugerem que altas concentrações de Si, coprecipitem metais como o ferro (Fe) e o cobre (Cu) essenciais à eficiência fotossintética.

2.4. Conclusão:

O metabolismo em plantas de mogno africano foi alterado devido ao estresse pelo Cd. Com o aumento das doses de Cd, um declínio dos açúcares redutores, redução do nitrato, glutamina sintetase e aminoácidos nas folhas e raízes foi observado. Juntamente com o aumento das doses de Cd, houve um acréscimo do nitrato, amônio, prolina e glicina-betaína nas folhas e raízes.

O Si não promoveu respostas satisfatórias no metabolismo da planta, não conseguindo atenuar o estresse por Cd nem na menor dose do metal (25 mg L⁻¹).

2.5. Referências:

ABDUL JALEEL, C.; MANIVANNAN, P.; KISHOREKUMAR, A.; SANKAR, B.; GOPI, R.; SOMASUNDARAM, R.; PANNEERSELVAM, R. Alterations in osmoregulations, antioxidant enzymes and indole alkaloid levels in *Catharanthus roseus* exposed to water defi cit. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v.59, p.150-157, nov. 2007.

ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R.F. et al. Tópicos em ciência do solo. **Viçosa**: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.299-352, 2000.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. Cercla prioritylistofhazardoussubstances. Atlanta, 2011. Disponível em: <<http://www.atsdr.cdc.gov/SPL/index.html>>. Acesso em: 8 fevereiro. 2019.

AHMAD, P., SARWAT, M., BHAT, N. A., WANI, M. R., KAZI, A. G., & TRAN, L. S. P. Alleviation of cadmium toxicity in *Brassica juncea* L. (Czern. & Coss.) by calcium application involves various physiological and biochemical strategies. **PloS one**, v.10, n.1, p.0114571, 2015.

ALLOWAY, B.J. Heavy Metals in Soils. **New York**: John Wiley & Sons, 339p.,1990.

ALVES, G. A. R. Aspectos ecofisiológicos, bioquímicos e crescimento de plantas jovens de ipê-amarelo (*Tabebuia serratifolia* (Vahl) Nicholson) em condições de déficit hídrico e alagamento. Tese (Doutorado em ciências agrárias) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Pará, Belém, 2010.

ARAÚJO MUP, RIOS JA, SILVA ET, RODRIGUES FA. Silicon alleviates changes in the source-sink relationship of wheat plants infected by *Pyricularia oryzae*. **Phytopathology**, p. PHYTO-11-18-0428-R, 2019.

ASHRAF, M.; FOOLAD, M. R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. **Environmental and Experimental Botany**, v.59, p.206-216, 2007.

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). Toxicological Profile forCadmium. U.S. Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, GA. 2008.

AUGUSTO, A. S.; BERTOLI, A. C.; CANNATA, M. G.; CARVALHO, R.; BASTOS, A. R. R. Avaliação dos efeitos tóxicos de Cd e Pb na cultura da mostarda (*Brassicajuncea*). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. spe, p. 61-68, 2014.

BAKER, A. J. M. Metal tolerance. **New Phytologist**, Cambridge, v. 106, n. 1, p. 93-111, May 1987.

BALOTF, S.; NIAZI, A.; KAVOOSI, G.; RAMEZANI, A. Differential expression of nitrate reductase in response to potassium and sodium nitrate: real-time PCR analysis. **Australian Journal of Crop Science**, v. 6, p. 130 - 134, 2012.

BATES LS, WALDREN RP, TEARE ID. Rapid determination of free proline for water stress studies. **Plant and Soil**, v. 39, p. 205-207, 1973.

BATISTA F. Mogno Africano, cultivo no estado de Minas Gerais. Piracicaba: **Casa do Produtor Rural**; 2010.

BAYLIS, A. D. et al. Effect of silicon on the toxicity of aluminium in soybean. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, v.25, n.5, p.537-546, 1994.

BENNETT, J.; PETER, J.; GLEN, L. C.; MICHAEL, C. T. T. Influence of defoliation on overwintering carbohydrate reserves, return bloom, and yield of mature Chardonnay grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, Davis, v. 56, n. 4, p. 386-393, 2005.

BERTOLI, A. C. Efeitos do cádmio e do chumbo no crescimento, translocação e teor de nutrientes tomateiro (*Lycopersicon esculentum*) cultivado em solução nutritiva. 2011. 95p. **Dissertação** (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

BISINOTI MC, YABE MJS E GIMENEZ SMN. Avaliação da influência de metais pesados no sistema aquático da bacia hidrográfica da cidade de Londrina – PR. **Revista Analytica**. 8: 22-27, 2004.

BOKHTIAR, S.M., HUANG, H-R., LI, Y-R, DALVI, V.A. Effects of silicon on yield contributing parameters and its accumulation in abaxial epidermis of sugarcane leaf blades using energy dispersive x-ray analysis. *Journal of Plant Nutrition*, v.35, p.1255-1275, 2012.

BREDEMEIER, Christian; MUNDSTOCK, Claudio Mario. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 365-372, Apr. 2000. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782000000200029>.

BRITTO, D. T., SIDDIQI M. Y.; GLASS, A. D.; KRONZUCKER H. J. Futile transmembrane NH₄ + cycling: a cellular hypothesis to explain ammonium toxicity in plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 98, p. 4255-4258, 2001.

BUDOWSKI G. Distribution of tropical American rainforest species in light of successional processes. **Turrialba**; 15: 40-43, 1965.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F.; CASAGRANDE, J.C. Reações dos micronutrientes e elementos tóxicos. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B.van; ABREU, C.A. (Eds.) **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS, 222p., 2001.

CATALDO, D. A.; HAROON, S. L. E.; YOUNG, V. L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Commum Soil Science Plant Analyse*, v.6, p.71-80, 1975.

Centre for Agriculture and Biosciences International – CABI. **Forestry Compendium** [online]. Wallingford: CAB International; 2013.

CHEN D, CAO B, WANG S, LIU P, DENG X, YIN L, ZHANG S. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific reports** 6:22882, 2016.

CHEN, T. H. H.; MURATA, N. Glycinebetaine protects plants against abiotic stress: mechanisms and biotechnological applications. **Plant, Cell & Environmental**, Weinheim, v. 34, n. 1, p. 1-20, 2011.

CHENG, MIAOMIAO ET AL. “Cadmium accumulation is enhanced by ammonium compared to nitrate in two hyperaccumulators, without affecting speciation.” **Journal of experimental botany** vol. 67,17 (2016): 5041-50. doi:10.1093/jxb/erw270

CHIRAZ CHAFFEI, KARINE PAGEAU, AKIRA SUZUKI, HOUDA GOUIA, MOHAMED HABIB GHORBEL, CÉLINE MASCLAUX-DAUBRESSE, Mudanças induzidas por toxicidade de cádmio no gerenciamento de nitrogênio em *Lycopersicon esculentum* levando a uma proteção metabólica por meio de uma estratégia de armazenamento de aminoácidos, 45 **Fisiologia celular e vegetal**, , Edição 11, 15 de novembro de 2004, Páginas 1681–1693, doi.org/10.1093/pcp/pch192

CONAMA, BRASIL. Ministério do meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução nº420 de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 de dezembro. 2009.

CONCEIÇÃO, S. S. Fitorremediação de cádmio por *khaya ivorensis* a. chev. mitigação do estresse por silício nas modulações fisiológicas, bioquímicas e anatômicas. 2019. 104f. **Tese** (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, 2019.

CORREIA, L. G. B. Identificação e estudo das áreas favoráveis para o cultivo da *Khaya ivorensis* A. Chev. (mogno africano) no estado de Minas Gerais, utilizando modelagem ambiental e análise multicritério. **Dissertação** (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais). Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

COSTA, M. F. Dicionário de Termos Médicos. Editora: Porto Editora, Coleção: **DICIONÁRIOS TEMÁTICOS**. p. 1584, 2012.

DEDE, G., & OZDEMIR, S. Effects of elemental sulphur on heavy metal uptake by plants growing on municipal sewage sludge. **Journal of environmental management**, v.166, p.103-108, 2016.

DENSLOW JS. Tropical rainforest gaps and tree species diversity. **Annual Review of Ecology and Systematics**; v.18, n.1: 431-451, 1987.

DIAS, M. C. et al. Cadmium toxicity affects photosynthesis and plant growth at different levels. **Acta PhysiologiaePlantarum**, v.35, p.1281–1289, 2013.

DIXIT, V.; Pandey, V. & Shyam, R. Differential antioxidative responses to cadmium in roots and leaves of pea (*Pisum sativum* L. cv. Azad). **Journal of Experimental Botany** 52: 1101-1109, 2001.

DONG, J; MAO, W.H; ZHANG, G.P; WU, F.B; CAI, Y. Root excretion and plant tolerance to cadmium toxicity – a review. **Plant soil environ.**, 53(5): 193-200, 2007.

DUBOIS, M.; GILLES, K.A.; HAMILTON, J.K.; REBERS, P.A.; SMITH, F.

Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v. 28, p. 350-356, 1956.

D'SOUZA, M. R. D.; DEVARAJ, V. R. Biochemical responses of Hyacinth bean (*Lablab purpureus*) to salinity stress. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.32, n.2, p.341-353, 2010.

EDWARDS J.W.; CORUZZI G.M. Photorespiration and light act in concert to regulate the expression of the nuclear gene for chloroplast glutamine synthetase. **The Plant Cell**, 1, 241- 248, 1989.

FAROOQ, M., WAHID, A., KOBAYASHI, N., et al. (2009) Plant Drought Stress: Effects, Mechanisms and Management. **Agronomy for Sustainable Development**, 29, 185-212.

FOLI EG. Evaluation of the performance of planted native timber species in different ecological zones in Ghana [project PD 1/93. Final Technical Fellowship Report]. **Yokohama**: International Tropical Timber Organization; 41 p., 2000.

GAJDOS, E; LÉVAI, L; VERES, S AND KOVÁCS, B. Effects of Biofertilizers on Maize and Sunflower Seedlings under Cadmium Stress. **Comm Soil Sci Plant Anal.**, 43: 272-279, 2012.

GONG, H., ZHU, X., CHEN, K., WANG, S., ZHANG, C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v.169, p.313-321, 2005.

GOUIA, HOUDA & GHORBAL, MOHAMED & MEYER, CHRISTIAN. (2000). Effects of Cadmium on Activity of Nitrate Reductase and on Other Enzymes of the Nitrate Assimilation Pathway in Bean. **Plant Physiology and Biochemistry**. 38. 629-638. 10.1016/S0981-9428(00)00775-0.

GRIEVE, C.M., GRATTAN, S.R. Rapid assay for determination of water soluble quaternary ammonium compounds. **Plant and Soil** 70: 303-307, 1983.

GU, H. H., QIU, H., TIAN, T., ZHAN, S. S., CHANEY, R. L., WANG, S. Z., & QIU, R. L. Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil. **Chemosphere**, v.83, n.9, p.1234-1240, 2011.

GUO, Y.; MARSCHNER, H. Uptake, distribution, and binding of cadmium and nickel in different plant species. In: FERREIRA, M. E. et al. **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS, p. 58-70, 2001.

HAGEMAN, R. H. G. & HUCKLESBY, D. P., Nitrate reductase from higher plants. In: **Methods in enzymology**, 17 A: 491 – 503, 1971.

HALL, J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. **Journal of Experimental Botany**. V. 53, n. 1, 2002.

HATAMIAN M, NEJAD AR, KAFI M, SOURI MK, SHAHBAZI K (2020) Nitrate improves hackberry seedling growth under cadmium application. **Heliyon** 6(1):e 03247

KAMACHI, K.; YAMAYA, T.; MAE, T.; OJIMA, K. A role for glutamine synthetase in remobilization of leaf nitrogen during natural senescence in rice leaves. **Plant Physiology**, 96, 411-417, 1991.

KEMERICH, P. D. C.; FLORES, C. E. B.; BORBA, W. F.; GERHARDT, A. E.; FLORES, B. A.; RODRIGUES, A. C.; BARROS, G. Indicativo de contaminação ambiental por metais pesados em aterro sanitário. **Revista Monografias Ambientais**, v. 13, n. 4, p. 3744-3755, 2014.

KRASKA, J. E., & BREITENBECK, G. A. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 41, n. 17, p. 2075-2085, 2010.

LEHMANN, C.; REBELE, F. Assessing the potential for cádmium phyto remediation with *Calamagrostis epigejos*: a pot experiment. **International Journal of Phytoremediation**, London, v. 6, n. 2, p. 169-183, Apr. 2004.

LEMMENS, R. H. M. J. 2008. *Khaya ivorensis* A. Chev. [Internet] registro de Protabase. Louppe, D., Oteng-Amoako, A.A.; Brink, M. (Editors). **PROTA** (Recursos Vegetais da África Tropical / Recursos de l'Afrique vegetales tropicale), Wageningen, Holanda. <[Http://database.prota.org/search.htm](http://database.prota.org/search.htm)>. Acessado em 15 de fevereiro de 2020.

LI, J.-Y., FU, Y.-L., PIKE, S.M., BAO, J., TIAN, W., ZHANG, Y., CHEN, C.-Z., ZHANG, Y., LI, H.-M., HUANG, J., LI, L.-G., SCHROEDER, J.I., GASSMANN, W., GONG, J.-M., The Arabidopsis nitrate transporter NRT1.8 functions in nitrate removal from the xylem sap and mediates cadmium tolerance. **Plant Cell**. v. 22, p. 633–1646, 2010.

LIANG, NY., NIKOLIC, M., BÉLANGER, R., HAIJUN, G., SONG, A. Silicon in Agriculture. From Theory to Practice. **Dordrecht**: Dordrecht: Springer, p. 235, 2015.

LIMA, E. G. S., OLIVEIRA, T. B., CONCEIÇÃO, S.S., ATAÍDE, W. L. S., MALTAROLO, B. M., NOGUEIRA, G. A. S., OLIVEIRA NETO, C. F., COSTA, R. C. L. OKUMURA, R. S. Biochemical and physiological responses of andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) seedlings subjected to water deficit. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, p. 517-522, 2015.

LUX, A; MARTINKA, M; VACULÍK, M AND WHITE, P.J. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review. **J. Exp. Bot.**, 1-17, 2011.

MACDUFF, J. H.; JACKSON, S. B. Growth and preferences for ammonium or nitrate uptake by barley in relation to root temperature. **Journal of Experimental Botany**, v. 32, p. 521- 530, 1991.

MARQUES, J.J.G.S.M.; CURI, N.; SCHULZE, D.G. Trace elements in Cerrado soils. In: ALVAREZ, V.V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Eds.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2002. v.2, p.103-142, 2002.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. Second Edition. **San Diego: Academic Press**, 889 p. 2012.

MCNALLY S.F.; ORBANJO T.O.; HIREL B. Glutamine synthetase isoenzymes of *Striga hermonthica* and other angiosperm root parasites. **Journal of Experimental Botany**, 34, 610-614, 1983.

MIAO, B.H.; HAN, X.G.; ZHANG, W. H. The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. **Annals of Botany**, 105:967-973, 2010.

MING, D.F., PEI, Z.F., NAEEM, M.S., GONG, H.J., ZHOU, W.J. Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment. **Journal of Agronomy and Crops Science**, v.198, p.14-26, 2012.

MIYAZAWA, M., PAVAN, M. A., MURAOKA, T., CARMO, C. A., & MELO, W. J. D. Análise química de tecido vegetal. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**, 2009.

NOGUEIRA, G. A. dos S. Trocas Gasosas, Crescimento e Comportamento Bioquímico em Plantas Jovens de Paricá (*Schizolobium Amazonicum* Huber ex Ducke) em Diferentes Concentrações de Cádmio. 2018. 68f. **Tese** (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, 2018.

OLIVEIRA, L. R. Metais pesados e atividade enzimática em Latossolos tratados com lodo de esgoto e cultivados com milho. 2008. 108f. **Tese** (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Jaboticabal, 2008.

PAIVA, H. N. DE; CARVALHO, J. G. DE; SIQUEIRA, J. O. Índice de translocação de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) submetidas a doses crescentes de cádmio, níquel e chumbo. **Revista Árvore**, v26, n. 4, p. 467-473, 2002.

PINHEIRO, A. L.; COUTO L.; PINHEIRO, D.T.; BRUNETTA, J. M. F. C. Ecologia, silvicultura e tecnologia de utilizações dos mognos-africanos (*Khaya* spp.). **Viçosa**: Sociedade Brasileira de Agrossilvicultura; 2011.

RINNER, k. t.; saurer, m.; streit, k.; siegwolf, r. t. w. evaluation of a liquid chromatography method for compound specific $\delta^{13}\text{C}$ analysis of plant carbohydrates in alkaline media. **Rapid Commum Mass Spectrom**, n. 26, p. 2173-2185, 2012.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S. O Cultivo do Mogno Africano (*Khaya* spp.) e o Crescimento da Atividade no Brasil. **Floresta Ambient.**, Seropédica, v.24, e00076814, 2017.

RODRIGUES, A. C. D.; SANTOS, A. M.; SANTOS, F. S.; PEREIRA, A. C. C.; SOBRINHO, N. M. B. A. Mecanismos de Respostas das Plantas à Poluição por Metais Pesados: Possibilidade de Uso de Macrófitas para Remediação de Ambientes Aquáticos Contaminados. **Rev. Virtual Quim.**, v. 8, n.1, p. 262-276. 2016.

RODRIGUES, P. T. A.; & ORLANDELLI, R. C. Plantas como Ferramentas para a Remediação Ambiental: uma Revisão da Literatura. **Revista UNICIÊNCIAS**, v. 22, n. 1, p. 38-44, 2018.

ROY, S. K.; CHO S. W.; KWON, S. J.; KAMAL, A. H.; KIM, S. W.; OH, M. W.; LEE, M. S.; CHUNG, K. Y.; XIN, Z.; WOO, S. H. Morpho-physiological and proteome level responses to cadmium stress in sorghum. **PLoS ONE**, v. 11, n.11, p. 1-27, 2016.

SAHEBI, M. et al. Application of silicon in plant tissue culture. **In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant**, v. 52, n. 3, p. 226-232, 2016.

SANTOS, F. S. DOS; DO AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; MAZUR, N.; GARBISU, C.; BARRUTIA, O.; BECERRIL, J. M. Resposta antioxidante, formação de fitoquelatinas e composição de pigmentos fotoprotetores em *Brachiaria decumbens* Stapf submetida à contaminação com Cd e Zn. **Química Nova**. v.34, n. 16, 2011.

SARRUGE, J.R. Soluções nutritivas. *Summa Phytopathologica*, **Jaboticabal**, v.1, n.3, p.231-233, 1975.

SILVA, P. R. C. Avaliação da fito e genotoxicidade do chumbo em *Lactucasativa* L. **Dissertação** (Mestrado em Genética Molecular Comparativa eTecnológica) - Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real. 180p, 2014.

SINGH, R.; HEMANTARANJAN, A.; PATEL, P. K. Salicylic acid improves salinity tolerance in field pea (*Pisum sativum* L.) by intensifying antioxidant defense system and preventing salt-induced nitrate reductase (NR) activity loss. **Legume Research, Sadar**, v. 38, n. 2, p. 202-208, 2015.

SOUSA, J. do C. M. Fitorremediação de cádmio por *khaya ivorensis* a. chev. modulações ecofisiológicas e bioquímicas. 2018. 73f. **Dissertação** (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, 2018.

SOUZA, E. P. D.; SILVA, I. D. F. D.; FERREIRA, L. E. Mecanismos de tolerância a estresses por metais pesados em plantas. **Current Agricultural Science and Technology**, v. 17, n. 167, 2013.

SWAINE M. D.; WHITMORE T. C. On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. **Vegetatio**; 75(1-2): 81-86, 1988.

SWARBRECK, S. M., DEFOIN-PLATEL, M., HINDLE, M., SAQI, M. e HABASH, D. Z. New perspectives on glutamine synthetase in grasses. **Journal of Experimental Botany**, v.62, n.4, p.1511-1522, 2011.

TABUCHI, A., KIKUIA, S. E MATSUMOTO, H. (2004) Efeitos Diferenciais do Alumínio no Potencial Osmótico e Acumulação de Açúcar nas Células Raiz do Trigo Al-ResistenteAl-Sensível. **PhysiologiaPlantarum**,120,106-112. doi.org/10.1111/j.0031-9317.2004.0206

THOMSEN, H. C., ERIKSSON, D., MOLLER, I. S. e SCHJOERRING, J. K. Cytosolic glutamine synthetase: a target for improvement of crop nitrogen use efficiency? **Trends in Plant Science**, v.19, n.10, p.656-663, 2014.

TIRADO, R., & ALLSOPP, M. Phosphorus in agriculture: problems and solutions. **Greenpeace Research Laboratories Technical Report** (Review), v.2, 2012.

VERMA, S. & DUBEY, R.S. (2001). Effect of Cadmium on Soluble Sugars and Enzymes of their Metabolism in Rice. *Biologia Plantarum*. 44. 117-123.

10.1023/A:1017938809311.

VERZIGNASSI, J. R.; POLTRONIERI, L. S.; BENCHIMOL, R. L. Mancha-alvo em VIEIRA, Licielo Romero et al. Toxicidade de cádmio em plantas. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)**, v. 19, n. 2, p. 1574-1588, 2015.

YEMM, E. W.; COOCKING, E. C. The determination of amino-acids with ninhydrin. **Analyst**, v. 80, p. 209-213, 1955.

WEATHERBURN, M.W. Phenol hypochlorite reaction for determination of ammonia. **Analytical Chemistry**. v. 39, p.971-974, 1967.

WILKINS, D. A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth. **New Phytologist**, v. 80, n. 3, p. 623-633, 1978.

ZEMANOVÁ, VERONIKA ET AL. “Cadmium toxicity induced contrasting patterns of concentrations of free sarcosine, specific amino acids and selected microelements in two *Noccaea* species.” **PloS one** vol. 12,5 e0177963. 19 May. 2017, doi:10.1371/journal.pone.0177963.

ZHANG, G.-B., YI, H.-Y., GONG, J.-M. The Arabidopsis Ethylene/jasmonic acid-NRT signaling module coordinates nitrate reallocation and the trade-off between growth and environmental adaptation. **Plant Cell**. v. 26, p. 3984–3998, 2014.

ZHAO, L.; SUN, Y.L.; CUI, S.X.; CHEN, M.; YANG, H.M.; LIU, H.M.; CHAI, T.Y.; HUANG, F. Cd-induced changes in leaf proteome of the hyperaccumulator plant **Phytolacca americana**. *Chemosphere* v. 85, p. 56-66, 2011.

ZHU, Y.; GONG, H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. **Agronomy for Sustainable Development**, v.34, n.2, p.455-472, 2014.