



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JOSILENE DO CARMO MESCOUTO DE SOUSA

**FITORREMEDIAÇÃO DE CÁDMIO POR *Khaya ivorensis* A. Chev. MODULAÇÕES
ECOFISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS.**

BELÉM – PA
2018

JOSILENE DO CARMO MESCOUTO DE SOUSA

**FITORREMEDIÇÃO DE CÁDMIO POR *Khaya ivorensis* A. Chev.
MODULAÇÕES ECOFISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS.**

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

Orientador: Prof^o. Dr^o Cândido Ferreira de Oliveira Neto.

Coorientador: Prof^o. Dr^o Ricardo Shigueru Okumura.

**BELÉM – PA
2018**

Sousa, Josilene do Carmo Mescouto de

Fitorremediação de cádmio por *Khaya ivorensis* A. Chev. modulações ecofisiológicas e bioquímicas / Josilene do Carmo Mescouto de Sousa. – Belém, PA, 2018.

73 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais – Ecologia e Ecofisiologia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2018.

Orientador: Cândido Ferreira de Oliveira Neto.

1. Fitorremediação. 2. *Khaya ivorensis* A. Chev. 3. Metais Pesados – Toxidez. 4. Variáveis Ecofisiológicas. 5. Mogno Africano. I. Oliveira Neto, Cândido Ferreira de, (orient.) II. Título

CDD – 631.41



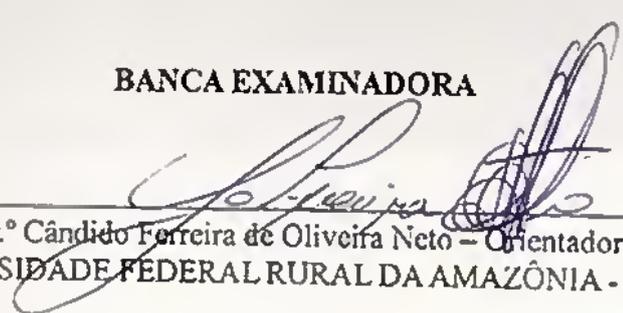
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

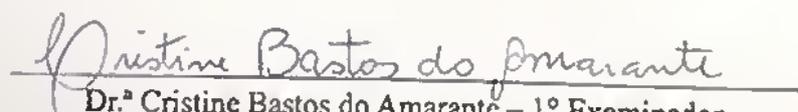
JOSILENE DO CARMO MESCOUTO DE SOUSA

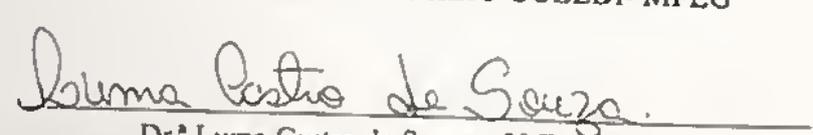
FITTORREMEDIAÇÃO DE CÁDMIO POR *Khaya ivorensis* A. Chev. MODULAÇÕES
ECOFISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS.

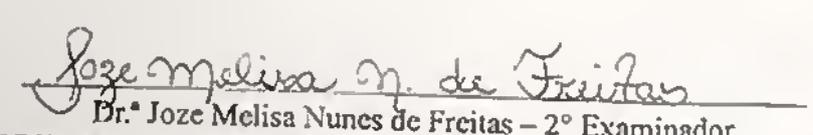
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, da Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre.

BANCA EXAMINADORA


Dr.º Cândido Ferreira de Oliveira Neto – Orientador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA


Dr.ª Cristine Bastos do Amarante – 1º Examinador
MUSEU PARAENSE EMILIO GOELDI- MPEG


Dr.ª Luma Castro de Souza – 3º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA


Dr.ª Joze Melisa Nunes de Freitas – 2º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus por ter estado ao meu lado sempre em todos os momentos de minha vida através de minha fé, guiando meus passos e minhas decisões.

A pessoa mais importante da minha vida, minha filha Maria Fernanda, por todo amor, carinho e compreensão durante todos esses anos de ausências, em busca de um futuro melhor para nos duas.

Aos meus pais José Fernando e Rosilene, pelo alicerce que foram e me fizeram chegar até aqui e aos meus irmãos José Victor e José Fernando Filho, amo vocês.

A minha família que sempre me apoiou em todas as decisões, minha avó Marly, meus tios e tias e meus primos.

A Denilson Pontes por todo carinho, compreensão e apoio dedicado para que esta dissertação tornar-se real.

As minhas amigas irmãs que sempre me acompanharam na vida acadêmica e pessoal, Ellen Gabriele, Hélia Dantas, Andresa Soares, Beatriz Melo, Kelle Ambé e Ana Carolina, o nosso céu azul.

Aos meus amigos Richard Rodrigues e Bruno Ferreira pelo companheirismo na vida acadêmica e pessoal.

Ao meu Orientador Dr^o Cândido de Oliveira Neto, pelos ensinamentos e por todo apoio para a realização deste trabalho. Ao meu Co-orientador Dr^o Ricardo Okumura pela ajuda na realização da escrita e todo apoio.

À Universidade Federal Rural da Amazônia, que por anos foi minha segunda casa, mas que por vezes cheguei a pensar que era a primeira de tanto que permaneci nela, dias e noites.

A toda a equipe EBPS - Estudos da Biodiversidade de Plantas Superiores, que tornou este trabalho menos árduo, o meu muito obrigada a Vitor Resende, Glauco André, Kerolém Cardoso, Ana Ecídia, Thays Costa, Jéssica Martins, Liliane Machado, Wander Luiz, Waldemar Andrade, Silvia Coelho.

Ao Laboratório de Análises Químicas do Museu Paraense Emílio Goeldi, pelo apoio necessário para análises químicas.

Aos amigos que o mestrado me deu, Juscelino Palheta e Susana da Conceição, o meu muito obrigada.

Ao meu amigo e professor Antônio Moreira, por toda ajuda e paciência nestes anos todos de convivência na minha querida UFRA.

Ao meu amigo Rivaldo Nunes que por vezes cuidou das minhas mudinhas.

Á todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização desse trabalho.

“Até aqui nos ajudou o senhor” (Samuel 7:12)

O meu muito OBRIGADA!

“Com a força que Cristo me dá, posso
enfrentar qualquer situação”

Filipenses 4:13

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vasos adaptados com papel alumínio.....	38
Figura 2. Papel E.V.A para evitar a proliferação de algas na areia.....	38
Figura 3. Trocas gasosas verificadas com o IRGA.....	41
Figura 4. Medição da altura com auxílio de régua centimétrica.....	41
Figura 5. Medição caulinar com auxílio de paquímetro.....	41
Figura 6. Valores médios de condutância estomática (g_s) (a), transpiração (E) (b), fotossíntese (A) (c) e concentração interna de CO_2 (C_i) (d), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.....	50
Figura 7. Valores médios de temperatura foliar (T_f) (a) e eficiência do uso da água (EiUA) (b), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.....	52
Figura 8. Valores médios da altura da planta (c), diâmetro caulinar (b) e número de folhas (a) em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.....	53
Figura 9. Valores médios da massa seca da raiz (c), massa seca do caule (b) e massa seca das folhas (a) em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.....	55
Figura 10. Valores médios da Massa seca da parte aérea (a) e Massa seca total (b) em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.....	56
Figura 11. Valores médios de carboidratos solúveis totais na folha (CST $_f$) (a) e na raiz (CS $_r$) (b), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.....	57
Figura 12. Valores médios da concentração de amido na folha (CA $_f$) (a), e na raiz (CA $_r$) (b), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.....	58
Figura 13. Valores médios da concentração de sacarose na folha (CS $_f$) (a), na raiz (CS $_r$) (b), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.....	60
Figura 14. Valores médios da concentração de glicina na folha (a) e na raiz (b) e prolina na folha (c), e na raiz (d), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.....	61
Figura 15. Valores médios para o Fator de Bioacumulação (a) e Fator de Translocação (b), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.....	64
Figura 16. Valores médios para o nível crítico de toxidez na folha (NCT_PA) (a) e na raiz (NCT_R) (b), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição da solução nutritiva.	39
Tabela 2. Valores médios de Condutância Estomática (<i>gs</i>), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto de cádmio.....	47
Tabela 3. Valores médios de Fotossíntese (<i>A</i>), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto de cádmio.....	48
Tabela 4. Valores médios de Transpiração (<i>E</i>), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto de cádmio.....	49
Tabela 5. Valores médios de Concentração interna de CO ₂ (<i>Ci</i>), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto de cádmio.....	50
Tabela 6. Valores médios de Temperatura foliar (<i>Tf</i>), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto de cádmio.....	51
Tabela 7. Valores médios da Eficiência no uso da água (EiUA), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto de cádmio.....	52
Tabela 8. Valores médios da Altura da planta, Diâmetro caulinar e Número de folhas em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto de cádmio.....	53
Tabela 9. Valores médios da Massa seca da raiz, Massa seca do caule, Massa seca das folhas, Massa seca da parte aérea e Massa seca total em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto de cádmio.....	54
Tabela 10. Valores médios de Carboidratos solúveis totais na folha (CST _f) e na raiz (CST _r), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto de cádmio.....	57
Tabela 11. Valores médios da Concentração de amido na folha (CA _f), e na raiz (CA _r), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto de cádmio.....	58
Tabela 12. Valores médios da Concentração de sacarose na folha (CS _f), na raiz (CS _r), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto de cádmio.....	59
Tabela 13. Valores médios da Concentração de glicina e prolina na folha (CG _f), e na raiz (CG _r), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto de cádmio.....	60
Tabela 14. Valores médios da Concentração de Cádmio na folha (CC _f), no caule (CC _c) e na raiz (CC _r), em plantas de <i>Khaya ivorenses</i> submetidas a diferentes doses de cloreto de cádmio.....	62

SUMÁRIO

RESUMO	12
ABSTRACT	13
1. CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1. Objetivo Geral.....	17
1.1.2. Objetivos Específicos.....	17
1.2. REVISÃO DE LITERATURA	18
Espécie <i>Khaya ivorensis</i> A.Chev.....	18
Efeito dos metais pesados nas plantas.....	19
Cádmio.....	21
Efeito do cádmio nas plantas.....	22
Fitorremediação.....	24
1.3. REFERÊNCIAS	28
FITORREMEDIAÇÃO DE CÁDMIO POR <i>Khaya ivorensis</i> A. Chev. MODULAÇÕES ECOFISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS	35
1. INTRODUÇÃO	35
2. MATERIAL E MÉTODOS	37
2.1. Material vegetal e condições de cultivo.....	37
2.2. Transplântio e solução nutritiva.....	37
2.3. Coleta e armazenamento do material.....	40
2.4. Variáveis Ecofisiológicas	40
2.5. Variáveis Biométricas.....	40
2.6. Variáveis Bioquímicas.....	42
2.6.1. Carboidratos Solúveis Totais.....	42

2.6.2. Amido.....	42
2.6.3. Sacarose.....	43
2.6.4. Glicina-betaína.....	44
2.6.5. Prolina.....	44
2.7. Análise de Cd	45
2.7.1. Fator de Bioacumulação (FB), Fator de Translocação (FT) e dose crítica de toxidez.....	45
2.8. Análise estatística.....	46
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
3.1. Variáveis Ecofisiológicas	47
3.1. 1. Condutância estomática.....	47
3.1.2. Fotossíntese.....	48
3.1.3. Transpiração.....	49
3.1.4. Concentração interna de CO ₂	49
3.1.5. Temperatura foliar.....	51
3.1.6. Eficiência do uso da água.....	51
3.2. Variáveis Biométricas.....	53
3.2.1. Altura da planta, diâmetro caulinar e número de folhas.....	53
3.2.2. Massa seca da raiz, do caule, das folhas, MSPA e MST.....	54
3.2.3. Relação entre massa seca da raiz/massa seca da parte aérea.....	56
3.3. Variáveis Bioquímicas.....	56
3.3.1. Carboidratos Solúveis Totais.....	56
3.3.2. Concentração de Amido na folha e na raiz.....	57
3.3.3. Concentração de Sacarose na folha e na raiz.....	59
3.3.4. Concentração de Glicina-betaína e Prolina na folha e na raiz.....	60

3.3.5. Concentração de Cádmio na planta.....	62
3.3.6. Fator de Bioacumulação (FB), Fator de Translocação (FT) e Dose crítica de toxidez.....	63
4. CONCLUSÃO	66
5. REFERÊNCIAS	67

RESUMO

A contaminação do solo por cádmio representa um perigo agrícola, para produção de alimentos, e para questão ambiental em todo o mundo. Diante dos problemas causados por este e outros metais é necessário que se remova ou estabilize os mesmos do solo, para que não haja contaminação dos ecossistemas. Uma das opções para se recuperar a atividade e a diversidade desses ambientes é a fitorremediação. Com isso o objetivo deste trabalho foi avaliar as respostas de crescimento, características fisiológicas e bioquímicas de plantas de *Khaya ivorensis* A. Chev. submetidas a diferentes doses de CdCl₂. O experimento foi conduzido na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), em Belém do Pará, nos meses de dezembro de 2015 a abril de 2016. Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, com 5 tratamentos (Controle, 10 CdCl₂ mg/L⁻¹, 20 CdCl₂ mg/L⁻¹, 30 CdCl₂ mg/L⁻¹, 40 CdCl₂ mg/L⁻¹) e 7 repetições. Com as crescentes doses do metal, as plantas *Khaya ivorensis* A. Chev., apresentaram como resposta um declínio nos parâmetros biométricos, fisiológicos e bioquímicos, porém não causaram a morte dos vegetais. O tratamento com a dose de 10 CdCl₂ mg/L⁻¹ obteve os maiores valores tanto para o fator de translocação quanto para o fator de bioacumulação, nenhum dos tratamentos apresentou nível crítico de toxidez. A espécie *Khaya ivorensis* A. Chev. mostrou ser uma excelente alternativa para o método de fitorremediação em áreas contaminadas com cádmio.

Palavras chave: Ecofisiologia. Bioacumulação. Toxidez. Mogno Africano.

ABSTRACT

Contamination of the soil by cadmium represents an agricultural hazard, for food production, and for environmental issues around the world. In the face of the problems caused by this and other metals it is necessary to remove or stabilize the same of the soil, so that there is no contamination of the ecosystems. One of the options for recovering the activity and the diversity of these environments is phytoremediation. The objective of this work was to evaluate the growth responses, physiological and biochemical characteristics of plants of *Khaya ivorensis* A. Chev. submitted to different doses of CdCl_2 . The experiment was conducted at the Federal Rural University of Amazonia (UFRA), in Belém of Pará, from December 2015 to April 2016. A completely randomized experimental design was used with 5 treatments (control, 10 CdCl_2 mg/L^{-1} , 20 CdCl_2 mg/L^{-1} , 30 CdCl_2 mg/L^{-1} , 40 CdCl_2 mg/L^{-1}) and 7 repetitions. With increasing doses of the metal, the plants *Khaya ivorensis* A. Chev., Presented as a response a decline in the biometric, physiological and biochemical parameters, but did not cause the death of the plants. The treatment with the dose of 10 CdCl_2 $\text{mg} / \text{L}^{-1}$ obtained the highest values for both the translocation factor and the bioaccumulation factor, none of the treatments presented a critical level of toxicity. The *Khaya ivorensis* A. Chev species proved to be an excellent alternative for the phytoremediation method in areas contaminated with cadmium.

Keywords: Ecophysiology. Bioacumulation. Toxicity. African mahogany.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

As atividades antrópicas voltadas para a mineração, indústrias metalúrgicas e químicas, agricultura, dentre outrags, têm causado distúrbios na biosfera, ao liberar compostos orgânicos como hidrocarbonetos, inorgânicos e os metais pesados presentes em grande parte desses rejeitos (BHARGAVA, 2012). No entanto, pesquisas mostram que o processo para obtenção desses recursos pode causar impactos ambientais, comprometendo a saúde da população, dos ecossistemas e a vida de futuras gerações. Entretanto essas atividades são de fundamental importância para a obtenção da matéria-prima necessária para a fabricação de bens indispensáveis ao homem, trazendo inúmeros benefícios para a sociedade (FRANÇA, 2011).

A poluição do solo tem merecido atenção especial nos últimos anos por ocasionar graves impactos socioambientais, desse modo, é notório o crescente interesse mundial, dessa forma tem-se direcionado a Política Pública Nacional na elaboração de leis de proteção ao meio ambiente (CONAMA nº 460/2013: 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). Entre as várias formas de poluição do solo, os metais pesados, são de grande preocupação por serem mais persistentes no ambiente que os poluentes orgânicos.

Os metais pesados são definidos como elementos com densidade maior que 5 g/cm^3 , os quais podem ser altamente reativos e bio-acumulativos para alguns organismos, ou seja, não são capazes de eliminá-los (BERTOLAZI et al., 2010). Para esses autores os problemas por contaminação de metais pesados de efeito antrópico, tiveram início na idade Média com as atividades mineradoras, mas foi acelerado no início do século XIX com o processamento de metais em plantas químicas e de fundição. Segundo Souza et al. (2011), os metais pesados afetam o crescimento, a distribuição e o ciclo biológico das espécies vegetais. E dentre os elementos responsáveis pelo estresse em plantas, está o cádmio.

O cádmio (Cd) é um metal pesado de alta toxicidade, solúvel em água e, relativamente mais biodisponível no solo do que outros metais pesados (FERREIRA, 2013), tem densidade de $8,6 \text{ g/cm}^3$ (SOUZA et al., 2009). É tóxico para plantas e animais (ALLOWAY, 1990). Apesar de não ser um elemento essencial para os processos metabólicos, ele é efetivamente absorvido pelos sistemas radicular e foliar, e é altamente acumulado nos organismos do solo (MERLINO, 2010). O cádmio está presente em vários produtos industrializados como pigmentos, plásticos, produtos da metalurgia e galvanoplastia, pilhas, baterias, esmaltes, vidros,

tintas, lâmpadas fluorescentes, resíduos de pneus, óleos combustíveis, lubrificantes, carvão mineral, fungicida, etc (MALAVOLTA, 1994; PRASAD et al., 2001; HALL, 2002).

A contaminação do solo por cádmio representa um perigo agrícola potencial, para produção de alimentos, e ambiental em todo o mundo (RÖMKENS, 2011). O uso de fertilizantes fosfatados (FRANÇOIS, 2009; GRANT, 2011) constitui uma das fontes mais importantes de contaminação de Cd na agricultura (FERREIRA, 2013). Diante dos problemas causados por este e outros metais é necessário que se remova ou estabilize os mesmos do solo, para que não haja contaminação dos ecossistemas. Uma das opções para se recuperar a atividade e a diversidade desses ambientes é a fitorremediação, que é uma técnica que visa a descontaminação de áreas afetadas por estes metais que prejudicam o ambiente.

Segundo Chaves et al. (2010), a fitorremediação é uma tecnologia relativamente nova que utiliza as plantas para a descontaminação de solos, com custo razoável e baixo impacto ambiental, e tem sua aplicabilidade *in situ*. Em outras palavras, a principal finalidade dessa técnica consiste na descontaminação de áreas afetadas por estes metais que prejudicam o ambiente. Além disso, a fitorremediação tem capacidade de atender uma maior demanda com baixo custo e que apresenta o maior potencial de desenvolvimento futuro (CHEKOL, 2004).

Diante da importância desta técnica como remediadora para áreas contaminadas por metais pesados (cádmio), depreende-se, pois, da necessidade de pesquisas que relacionam a tolerância de espécies de clima tropical, desenvolvidas em níveis crescentes de contaminação, com os aspectos fisiológicos dessas plantas, para que possam ser efetivamente cultivadas como fitoextratoras nas áreas contaminadas no Brasil (BORIN, 2010). Assim sendo o presente trabalho visa responder às seguintes questões científicas: O *Khaya ivorensis* tem potencial como fitorremediador por cádmio? A hipótese testada é: O *Khaya ivorensis* tem potencial fitorremediador; outra questão é: As respostas de crescimento e modulações em relação as dosagens de cádmio terão uma resposta positiva na dosagem máxima estabelecida? A hipótese testada é: O crescimento e as modulações da espécie serão diferentes em relação as dosagens de cádmio obtendo resposta positiva a dosagem máxima, com possibilidade da espécie ser uma hiperacumuladora.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

-Avaliar as respostas de crescimento, características fisiológicas e bioquímicas de plantas de *Khaya ivorensis* A. Chev. submetidas a diferentes doses de cloreto de cádmio.

1.1.2. Objetivos Específicos

-Avaliar as características bioquímicas (carboidratos solúveis totais, amido, sacarose, glicina-betaína e prolina) em folhas e raízes de plantas de *Khaya ivorensis* A. Chev. submetidas a dosagens de CdCl₂;

-Determinar a biometria (altura da planta, diâmetro do caule, nº de folíolos, massa seca parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST) e relação entre MSR/MSPA) das plantas de *Khaya ivorensis* A. Chev. submetidas a tratamentos com dosagens de CdCl₂;

-Analisar as características ecofisiológicas (fotossíntese, transpiração, condutância estomática, concentração interna de CO₂, temperatura foliar, eficiência do uso da água);

- Analisar a absorção de cádmio pelas plantas;

- Determinar o fator de translocação (FT), fator de bioacumulação (FB) e dose crítica de toxidez.

1.2. REVISÃO DE LITERATURA.

Espécie *Khaya ivorensis* A. Chev.

A *Khaya ivorensis* pertence à família Meliaceae A. juss., subfamília III, SWIETENIOIDEAE, Tribo 2, SWIETENIEAE e ao gênero *Khaya* (A Chev.). Trata-se de árvore sempre verde ou decídua (PINHEIRO, 2011), que ocorre naturalmente em regiões tropicais úmidas, de baixa altitude (LAMPRECHT, 1990; LEMMENS, 2008), em áreas com precipitação anual de 1.600 a 2.500 mm e uma estação seca de dois a três meses, prefere solos aluviais que são úmidos, mas bem drenados, porém também pode ser encontrada em encostas sobre solos lateríticos (PINHEIRO, 2011). As sementes podem germinar a pleno sol, bem como na sombra, mas a regeneração natural é aparentemente escassa em grandes lacunas (CORCIOLI, 2013).

Lamprecht (1990) ressalta que *K. ivorensis* é heliófila, sendo tolerante à sombra na fase jovem. É uma espécie amplamente cultivada dentro da sua área natural de distribuição, mas também na Ásia e América tropical, apesar de ocorrer normalmente em vales úmidos, suportando inclusive inundações durante o período das chuvas (CORCIOLI, 2013), é muito sensível ao período de estiagem (GROGAN et al., 2002). Segundo Lemmens (2008), a espécie teve sua origem e distribuição a partir da Costa do Marfim e de Camarões, leste e sul de Cabinda (Angola) e, possivelmente, também ocorre na Guiné, Libéria, República Centro Africano e Congo. Na Malásia, a espécie *K. ivorensis* é uma das mais exóticas da África que têm alta adaptabilidade em florestas degradadas, por isso é recomendada para florestamento para atender às necessidades da indústria madeireira (HERYATI et al., 2011).

No Brasil a espécie é conhecida como mogno africano, as regiões Norte e Sudeste são as maiores produtoras, sendo as espécies *K. ivorensis*, *K. senegalensis* e *K. anthotheca* as mais cultivadas (PINHEIRO et al., 2011). Segundo Correia (2015), foi introduzido no Brasil em 1973, e vem demonstrando adaptar-se muito bem às condições climáticas do país, o plantio começou no Estado do Pará, pela Embrapa Amazônia Oriental, com umas poucas sementes provenientes da Costa do Marfim. Foram de início, produzidas seis mudas, que logo se tornaram matrizes da maioria dos plantios hoje existentes (PINHEIRO et al, 2011).

Segundo Falesi e Baena (1999), o *K. ivorensis* tem sido uma das espécies preferidas pelos reflorestadores no estado do Pará. É uma árvore de grande importância devido ao seu alto valor no comércio internacional e crescimento relativamente rápido, promovendo a recuperação de áreas alteradas, além de oferecer resistência a algumas pragas, como a broca do ponteiro (*H.*

grandella) (LEMMENS, 2008; VERZIGNASSI et al., 2009). A comercialização da madeira é garantida e atinge preços elevados no mercado nacional e internacional, com preços muitas vezes acima daqueles praticados pela venda do mogno nacional, tornando-se um bom investimento em médio prazo (CORREIA, 2015).

A espécie *K. ivorensis* apresenta uma madeira muito tenra ou tenra, muito leve ou leve e sua densidade varia de 0,46 a 0,55 g.cm³, com média de 0,488 g.cm³, sua dureza varia de 1,3 a 2,2 (CORCIOLI, 2013). A dureza é uma medida que segue o método de Chalet-Meudon e a densidade é sempre dada para madeiras com 12% de umidade (PINHEIRO et al., 2011). Segundo Correia (2015), pode ser propagada por sementes, sendo que 1.000 sementes pesam entre 130 e 310g.

Sua madeira é altamente valorizada pela indústria moveleira nos trabalhos de marcenaria para confecção de caixas e estojos decorativos, compensados, laminados e para molduras de janelas, painéis, portas e escadas (CORREIA, 2015). É adequada tanto para construções leves, assoalhos leves quanto para construção de navios e embarcações, canoas escavadas, corpos de veículos, cabos, instrumentos esportivos e musicais, brinquedos, inovações, instrumentos de precisão, entalhes, torneados e escadas, sua polpa de celulose pode ser empregada na indústria de papel (FREITAS, 2015). A madeira ainda pode ser aproveitada na produção do carvão e da lenha (PINHEIRO et al, 2011).

Efeito dos metais pesados nas plantas

As ações antrópicas são responsáveis por adições de até 1,16 milhões de toneladas de metais por ano em ecossistemas terrestres e aquáticos no mundo todo (MUNIZ e OLIVEIRA FILHO, 2006). No Brasil, a mineração de níquel, ouro, ferro e de outros metais de interesse comercial, têm contribuído com a liberação de rejeitos que se constituem como uma das principais formas de contaminação do solo e da água por metais pesados (MUNIZ, 2008). O aumento nas concentrações desses rejeitos no solo e nos efluentes próximos a zonas de mineração pode estar relacionado com processos químicos e biológicos que controlam a solubilidade, a disponibilidade as plantas e a mobilidade desses no solo (GUILHERME et al., 2005).

Plantas cultivadas em solos poluídos podem acumular Cd em níveis subfitotóxicos, aumentando os riscos para os consumidores, uma vez que mesmo concentrações não tão elevadas nos alimentos representam um significativo efeito adverso para a saúde humana e

animal (CANNATA, 2011). Muito embora sejam reconhecidos na literatura a essencialidade de alguns metais pesados às plantas, alguns deles, quando absorvidos em altas concentrações são fitotóxicos (BORIN, 2010).

A toxicidade de metais pesados às plantas pode ocorrer em diferentes níveis: rotas bioquímicas (respiração e fotossíntese), integridade de macromoléculas (DNA e proteínas), características genéticas (metagênese) e biologia celular (TORRES e JOHNSON, 2001). Segundo Hall (2002), os sintomas de toxicidade visíveis em concentrações excessivas de metais pesados podem ser atribuídos a uma extensa interação em níveis celulares e moleculares.

A acumulação de metais pelas plantas, além de sua natureza, depende de fatores como o pH, matéria orgânica, concentração do metal e presença de ânions, textura do solo, além de temperatura, luminosidade, umidade, presença de corretivos e fertilizantes, aeração, potencial redutor do solo e presença de micorrizas (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 2001).

A maioria dos metais é muito insolúvel para mover-se livremente no sistema vascular das plantas, assim, geralmente, formam precipitados com carbonatos, sulfatos, ou fosfatos, imobilizando-os em compartimentos intra e extracelulares (CANNATA, 2011). Alguns metais são acumulados nas raízes, provavelmente devido a barreiras fisiológicas contra o transporte de metais para as partes aéreas, enquanto outros são facilmente transportados nas plantas, como o Cd (GARBISU e ALKORTA, 2001).

Segundo Pombo (1995), os metais pesados na forma de sais, como cromatos, nitratos, cloretos e sulfatos são mais facilmente absorvidos pelas plantas do que quantidades equivalentes dos mesmos na forma de lodos industriais ou domésticos. Isso ocorre porque na forma de íons os metais se complexam com maior facilidade aos aminoácidos livres ou proteínas presentes nas plantas (CANNATA, 2011).

Segundo Marschner et al. (1996), os teores de metais tóxicos, incluindo os micronutrientes, apresentam concentrações na matéria seca das plantas na seguinte ordem, de forma decrescente: folha < que raízes de reserva < que tubérculos < que frutos carnosos < que sementes.

A acumulação destes metais pesados em plantas difere grandemente entre espécies vegetais e, também, entre órgãos ou tecidos (RAMOS et al., 2002). As plantas ao absorverem em excesso os diferentes metais pesados, sofrem alterações na atividade de enzimas que contém ferro, enzimas estas, ligadas à fotossíntese, ao sistema de defesa antioxidante e à tolerância

hídrica (LIU et al., 2007). Inibição do crescimento, descoloração, clorose, necrose e epinastia foliar são, usualmente, alguns dos sintomas visíveis característicos da toxicidade dos metais pesados (DÍAZ et al., 2001).

Cádmio

O cádmio é um elemento metálico branco-azulado, muito dúctil e que pode facilmente se reduzir a folhas ou fios delgados (FERNANDES et al, 1996). É considerado um metal pesado por apresentar número atômico 48 e massa específica $8,642 \text{ g cm}^{-3}$ (DIAS, 2003). Situa-se em sétimo lugar na lista dos 20 compostos mais tóxicos existentes na natureza (AL-KEDHAIRY et al., 2001). O tempo de permanência de cádmio no solo excede milhares de anos (ALLOWAY, 1993).

A presença natural de cádmio no meio ambiente, aparentemente, não tem causado problemas significativos para a saúde humana, pois encontra-se em baixas concentrações. Em rochas sedimentares e magmáticas as concentrações de Cd, giram em torno de $0,3 \text{ mg kg}^{-1}$, e a concentração média em solos não contaminados, em escala mundial, está entre $0,06$ e $1,1 \text{ mg kg}^{-1}$ (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1992). Porém, a ampla utilização na indústria faz com o cádmio seja um dos mais frequentes contaminantes do meio ambiente (MUNIZ, 2006). Podendo ser adicionado ao solo por meio de resíduos de pneus, óleos, pela deposição de lixo urbano, lodo de esgoto, resíduos de mineração, indústrias de plásticos e lubrificantes, pilhas e fertilizantes fosfatados (BERGMANN, 1992).

A contaminação com Cd é especialmente importante quando o solo é utilizado para fins agrícolas, uma vez que ele é facilmente transferido do solo para as plantas, entrando na cadeia trófica (JARUP, 2003). Segundo Kirkham (2006), a contaminação com Cd tem ocorrido no mundo todo. Pesquisas realizadas nos últimos 40 anos têm demonstrado a relação entre o consumo em longo prazo de arroz contaminado com Cd e doenças humanas, principalmente no Japão, China e Tailândia (PHAENARK et al., 2009). Só no Japão, a contaminação com Cd foi responsável por mais de 100 mortes no período de 1922 a 1965, uma doença associada à exposição ao Cd é enfisema pulmonar e a notória doença Itai-Itai (YEUNG e HSU, 2005). Doença esta que resulta em dolorida desmineralização de ossos (osteoporose) isso porque o Cd ocupa o lugar do cálcio nos ossos (BORIN, 2010).

O cádmio é um veneno cumulativo que se deposita nos tecidos do corpo, e em casos agudos, são identificáveis como Cadmiose: além dos efeitos renais, pode ser considerado como um elemento etiológico para vários processos patológicos no homem, incluindo tumores nos

testículos, hipertensão arterial, arteriosclerose, doenças crônicas de envelhecimento (OMS, 1998). O Cd acumula em animais, principalmente nos rins, fígado e órgãos reprodutivos, elevados níveis causam danos no fígado e baixos níveis na dieta estão relacionados a disfunções renais (BORIN, 2010).

Apesar de não ser um elemento essencial para os processos metabólicos, ele é efetivamente absorvido pelos sistemas radicular e foliar, e é altamente acumulado nos organismos do solo (MERLINO, 2010). O Cd é relativamente muito móvel nas plantas, apesar de sua translocação nos tecidos vegetais ser restrita por ser facilmente aprisionado, principalmente, em sítios de troca de compostos ativos da parede celular (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1992).

Efeito do cádmio nas plantas

Segundo Foy et al. (1978), os principais sintomas de toxicidade de Cd em plantas são: a redução do crescimento vegetal (SHAH, 2001), influência forte sobre a produção de biomassa (BENAVIDES et al., 2005), aparecimento de manchas marrons nas margens das folhas, pecíolos e veias avermelhadas, folhas enroladas, murchamento (ALLOWAY, 1990), redução das raízes e da condutividade hidráulica atribuída, dentre outros fatores, à deficiência nutricional (FORNAZIER et al., 2002; JIANG et al., 2005; KÜPPER et al., 2007).

Dentre os sintomas nutricionais provocados pela toxicidade de Cd, às plantas, está a deficiência de Fe, a qual pode ser causada pela competição entre os dois cátions por sítios de absorção na membrana plasmática (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1992). Neste aspecto, por essa deficiência nutricional, é justificável a sintomatologia de clorose, a qual é observada em maior grau nas folhas novas quando comparadas com as mais velhas, indicando que folhas jovens absorvem mais Cd, ou que elas são mais vulneráveis a toxidez causada por este metal pesado (KURDZIEL et al., 2004; KÜPPER et al., 2007). Além disso, a deficiência desse nutriente, também apresenta alta relação com a fotossíntese, logo a toxicidade de Cd, interfere significativamente no metabolismo fotossintético (PILON-SMITS et al., 2000; SCHÜTZENDÜBEL et al., 2001).

Deste modo, o efeito deste metal sobre o processo fotossintético, abrange a redução na síntese e modificação na fluorescência da clorofila, mudança na concentração e composição de outros pigmentos, inibição do fotossistema II (VECCHIA et al., 2005). Atuando ainda, indiretamente, no fechamento estomático e leva à ruptura das membranas celulares (ANDRADE et al., 2005),

Outro efeito do cádmio neste processo, parece ser o desvio da rota normal do transporte de elétrons para a produção de radicais livres (VIEIRA, 2015). Concentrações entre 5 – 30 mg kg⁻¹ na matéria seca da parte aérea das plantas são consideradas tóxicas para quase todas às espécies (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001).

O cádmio, interfere em muitas funções celulares, principalmente pela formação de complexos com grupos externos de compostos orgânicos, tais como as proteínas, resultando na inibição de atividades essenciais (METWALLY et al., 2003), alterações tanto metabólicas quanto enzimáticas (BARCELÓ et al., 1988; GUIMARÃES, 2008). Dentre elas, estão as enzimas-chave de várias rotas metabólicas, incluindo do Ciclo de Calvin (SHAH et al., 2001; FORNAZIER et al., 2002), da glicólise e da assimilação do sulfato (CARDOSO et al., 2002; PEREIRA et al., 2002).

O efeito tóxico desse metal sobre a atividade das enzimas pode, em partes, ser explicado por combinação com grupos tiólicos (-SH) de enzimas e proteínas, o que provoca desarranjos no metabolismo (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE - OMS, 1998). Desse modo, altas concentrações de Cd no tecido vegetal, podem provocar alterações no sistema antioxidante das plantas, estimulando o acúmulo de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e eventualmente morte celular (SCHÜTZENDÜBEL et al., 2001).

A toxidez do Cd em plantas e organismos vivos em geral relaciona-se à facilidade de combinação do elemento com grupos químicos das enzimas envolvidas no metabolismo (CANNATA, 2011). Segundo Guo e Marschener (2001), a redistribuição de cádmio na planta está associada às fitoquelatinas. O complexo Cd-fitoquelatinas pode representar uma forma móvel para o transporte de cádmio das raízes para as partes aéreas (CANNATA, 2011). A fitoquelatina é uma estrutura complexa, formando peptídeos ricos em cisteína, ou seja, ricos em aminoácidos, que são doadores de elétrons, condição necessária à formação de complexos com metais de transição (ácidos de Lewis), como é o caso do Cd (MALAVOLTA, 2006).

Pesquisas mostram que o cádmio ocupa sítios de ligação de certos nutrientes essenciais, modificando suas funções nas células vegetais (VIEIRA, 2015). No caso do cálcio, substituí-lo na proteína calmodulina, importante na sinalização celular, inibindo a atividade da fosfodiesterase dependente do complexo Ca-calmodulina (SANITA DI TOPPI e GABBRIELLI, 1999; SCHÜTZENDÜBEL e POLLE, 2002). Já no caso do zinco, ao substituí-lo, o cádmio inibe metaloenzimas tais como a fosfatase alcalina, a ATPase, a anidrase carbônica, a dipeptidase e a oxirredutase do NADPH (PAIVA et al., 2001; BENAVIDES et al., 2005). Outra interferência importante deste metal parece ser na absorção de nitrato e na sua

translocação para a parte aérea, ao inibir a atividade da redutase do nitrato (SANITA DI TOPPI e GABBRIELLI, 1999). Segundo Liu et al., (2007), dependendo do tempo de exposição e da quantidade acumulada de cádmio, levam a planta à morte.

Fitorremediação

A fitorremediação consiste em um conjunto de tecnologias que faz uso de processos, que ocorrem naturalmente, pelos quais às plantas e a flora microbiana em sua rizosfera degradam e sequestram poluentes orgânicos e inorgânicos de solos e águas contaminadas (PILON-SMITS, 2005). É uma técnica que vem sendo amplamente empregada na descontaminação ambiental (LINDBLOM et al., 2006). Isso é possível porque algumas espécies vegetais conseguem se estabelecer em ambientes com elevados teores de metais pesados desenvolvendo estratégias para contornar a fitotoxicidade dessas substâncias (BOVET et al., 2006). Essas plantas são capazes de tolerar, absorver e translocar altos níveis de metais pesados que seriam tóxicos a qualquer outro organismo (KHAN et al., 2000). Segundo Suresh e Ravishankar (2004), compostos orgânicos sintéticos, xenobióticos, pesticidas, hidrocarbonetos e metais pesados, estão entre os contaminantes que podem ser efetivamente reparados pelas plantas. A fitorremediação é um processo sustentável, ecológico e oferece a possibilidade de recuperação de elementos metálicos (PILON-SMITS, 2005).

Devido ao custo relativamente baixo, a técnica comporta-se como uma atrativa opção para a despoluição de solos com metais pesados, principalmente em países em desenvolvimento, onde financiamentos para recuperação ambiental são escassos (NASCIMENTO et al., 2006). Accioly e Siqueira (2000) acreditam que é uma prática promissora, com mercado garantido no país, se for considerada a existência de inúmeras e extensas áreas contaminadas, particularmente com metais pesados. Ela tem alcançado popularidade em agências governamentais e indústrias que dispõem de orçamentos limitados, principalmente, pelos baixos custos, quando comparada aos outros métodos de remediação (VIEIRA, 2015).

Segundo Silva (2012), historicamente, o conceito de se utilizar plantas para remediar ambientes contaminados não é novo, há 300 anos, plantas foram utilizadas para o tratamento de águas residuárias na Alemanha. No fim do século 19, *Thlaspi caerulescens* e *Viola calaminaria* foram as primeiras espécies vegetais documentadas por acumular altos níveis de metais nas folhas (LASAT et al, 2000).

Em 1935, plantas do gênero *Astragalus* foram capazes de acumular mais de 0,6% de Selênio (Se) na biomassa seca da parte aérea (ZANCHETA, 2010). Uma década depois, foram identificadas culturas capazes de acumular mais de 1% de Níquel (Ni) na parte aérea (LASAT, 2000). A ideia da utilização de plantas para extrair metais dos solos contaminados foi reintroduzida e desenvolvida por Utsunomyia (1980) e Chaney (1983). O primeiro experimento de fitorremediação com Zinco (Zn) e Cd, foi conduzido por Baker et al. (1991).

Na fitorremediação, às plantas agem removendo, armazenando, transferindo, estabilizando e tornando inofensivos os metais pesados presentes no solo (VIEIRA, 2015). Sabe-se que às espécies lenhosas apresentam menor grau de tolerância aos níveis tóxicos de metais pesados quando comparadas às espécies herbáceas (ELTROP et al., 1991). Sendo assim, o sucesso dos programas de fitorremediação depende da seleção natural ou artificial que às espécies apresentam em resposta ao estresse causado por determinados poluentes (PIRES et al., 2003). Dentre os principais fatores que afetam o sucesso da fitorremediação destacam-se a disponibilidade de plantas com alta produção de biomassa e com capacidade para concentrar quantidades elevadas de metais pesados na parte aérea (SALT et al. 1995).

Segundo Oliveira et al. (2006) a espécie vegetal empregada em programas de fitorremediação deve possuir características específicas para obtenção de sucesso, como tolerância ao acúmulo do poluente, capacidade de manter as atividades celulares e de produzir grande quantidade de biomassa, além de se adaptar às condições do ambiente impactado, com reprodução, propagação e coleta facilitada, caso seja necessário, pesquisas envolvendo a utilização de plantas em estratégias desta técnica têm aumentado nos últimos anos, sendo esta considerada uma alternativa emergente na recuperação de áreas contaminadas (KAVAMURA e ESPOSITO, 2010; PAQUIN e CAMPBELL, 2004; XIAO et al., 2008).

Esta técnica utiliza plantas chamadas hiperacumuladoras, que têm a capacidade de armazenar altas concentrações de metais específicos (0,1% a 1%) (MARIANO e OKUMURA, 2012). O termo hiperacumuladora foi criado para descrever plantas que possuem capacidade de acumular concentrações elevadas de metais na parte aérea (BROOKS et al., 1977). Sendo aquelas capazes de extrair e reter concentrações acima de 10 mg kg⁻¹ de Hg; 100 mg kg⁻¹ de Cd; 1.000 mg kg⁻¹ de Co, Cr, Cu ou Pb e 10.000 mg kg⁻¹ de Ni, Zn ou Mn por matéria seca (BAKER e BROOKS, 1989; BAKER et al., 1994; RASKIN et al. 1994; MARQUES et al., 2000).

A literatura mostra que fitorremediação possui uma série de vantagens (COLE et al., 1995; CUNNINGHAM et al., 1996; VOSE et al., 2000), que são:

- Menor custo em relação às técnicas tradicionalmente utilizadas envolvendo a remoção do solo para tratamento *ex situ*, na maioria dos casos, os equipamentos e suprimentos empregados no programa de fitorremediação são os mesmos utilizados na agricultura. Assim, quando é implantada em áreas agrícolas, o custo deve ser ainda menor;
- Os compostos orgânicos podem ser degradados a CO₂ e H₂O, removendo toda a fonte de contaminação, não havendo, nessa situação, a necessidade de retirada das plantas fitorremediadoras da área contaminada;
- Fixação de nitrogênio atmosférico, no caso de leguminosas;
- Plantas ajudam no controle do processo erosivo, eólico e hídrico;
- Pode-se considerar, também, que a planta reduz o movimento descendente de água contaminada de camadas superficiais do solo para o lençol freático;
- Plantas são mais favoráveis, esteticamente, do que qualquer outra técnica de biorremediação e podem ser implementadas com mínimo distúrbio ambiental, evitando escavações e tráfego pesado.

A técnica da fitorremediação oferece muitos aspectos positivos, mas também existem inconvenientes. Segundo Macek et al. (2000), as principais são:

- Dificuldade na seleção de plantas para fitorremediação, principalmente em relação à descontaminação de herbicidas de amplo espectro de ação ou em misturas no solo;
- O tempo requerido para obtenção de uma despoluição satisfatória pode ser longo;
- O contaminante deve estar dentro da zona de alcance do sistema radicular;
- Clima e condições edáficas podem restringir o crescimento de plantas fitorremediadoras;
- Elevados níveis do contaminante no solo podem impedir a introdução de várias plantas na área contaminada;
- Potencial de contaminação da cadeia alimentar;
- Necessidade de disposição da biomassa vegetal, quando ocorre a fitoextração de poluentes não-metabolizáveis ou metabolizados a compostos também tóxicos.

A fitorremediação é uma tecnologia que ainda está em seus estágios iniciais de desenvolvimento e aplicações em grande escala ainda são limitadas, os resultados já obtidos indicam que às plantas são eficazes e podem ser utilizados na remediação de locais contaminados por metais tóxicos (SILVA, 2012).

1.3. REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C.E., [ed.] Tópicos em ciência do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.1, p.299-352, 2000.
- AL-KEDHAIRY, A. A.; AL-ROKAYAR, S. A.; AL-MISUED, F. A. Cadmium toxicity on cells stress response. **Pakistan Journal Biology Sciences**, Pakistan, v. 4, n. 1, p. 1046-1049, Jan. 2001.
- ALLOWAY, B. J. **Heavy metals in soils**. New York: J. Wiley, 339 p, 1993.
- ALLOWAY, B.J. **Heavy Metals in Soils**. New York: **John Wiley & Sons**, 339p.1990.
- ANDRADE, S. A. L. de; JORGE, R. A.; SILVEIRA, A. P. D. da. Cadmium effect on the association of jackbean (*Canavalia ensiformis*) and arbuscular mycorrhizal fungi. **Scientia Agricola**, v. 62, n. 4, p. 389-394, 2005.
- BAKER, A. J. M.; McGRATH, S. P.; SODOLI, C. M. D.; REEVES, R. D. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal accumulating plants. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 11, p. 41-49, 1994.
- BAKER, A.J.M., R.D. REEVES, AND S.P. MCGRATH.. In situ decon - tamination of heavy metal polluted soils using crops of metal- accumulating plants—a feasibility study. p. 539–544. In R.E. Hinchey Brown, F.A. Homer, M. Malik, and M. Chin. **Heinemann Publishers**, Stoneham, MA. 1991.
- BAKER, A.M.J.; BROOKS, R.R. Terrestrial higher plants with hyperaccumulate metallic elements – a review of their distribution, ecology and phytochemistry. **Biorecovery**, 1:81-126, 1989.
- BARCELÓ, J; VASQUES, M; POSCHENRIEDER, C. Structural and ultrastructural disorders in cadmium treated bush bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). **New Phytologist**, v.108, p.37-49, 1988.
- BENAVIDES, M. P.; GALLEGO, S. M.; TOMARO, M. L. Cadmium toxicity. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, p. 21-34, 2005.
- BERGMANN, W. **Nutritional disorders of plants: developments, visual and analytical diagnosis**. New York: G. Fischer, 741 p.1992.

- BERTOLAZI, A. A. et al. O papel das ectomicorrizas na biorremediação dos metais pesados no solo. **Natureza on line**. Espírito Santo, v. 8, n.1, p. 24-31, 2010.
- BHARGAVA, A., Carmona, F. F, BHARGAVA, M., SRIVASTAVA, S. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. **Journal of Environmental Management**, 2012.
- BORIN, A. L. D, C. **Fitorremediação de cádmio e zinco por Amaranthaceae**. Tese (Doutorado em Ciências do Solo). Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2010.
- BOVET, L.; KAMMER, P. M.; MEYLAN-BETTEX, M.; GUADAGNUOLO, R.; MATERA, V. Cadmium accumulation capacities of Arabis alpine under environmental conditions. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 57, n. 1/2, p. 80-88, Aug. 2006.
- CANNATA, M. G. **Efeitos de cádmio e chumbo no desenvolvimento de rúcula (Eruca sativa L.), rabanete (Raphanus sativus L.) e feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.) em solução nutritiva**. Tese (Doutorado em Bioquímica). Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2011.
- CARDOSO, P. F.; MOLINA, S. M. G.; PEREIRA, G. J. G.; VITÓRIA, A. P; AZEVEDO, R. A. Response of rice inbred lines to cadmium exposure. **Journal Plant Nutrition**, v. 25, p. 927-944, 2002.
- CHANEY RL. **Plant uptake of inorganic waste constituents**. In: Parr JF, Marsh PB, Kla JM, eds. Land treatment of hazardous wastes. Park Ridge, NJ, USA: Noyes Data Corporation, 50–76. 1983.
- CHAVES, L. H. G., Mesquita, E. F., Araujo, D. L., e França, C. P. Acúmulo e distribuição de cobre e zinco em mamoneira cultivar BRS Paraguaçu e crescimento da planta. **Engenharia-Ambiental-Espírito Santo do Pinhal**, 7(3), 263-277, 2010.
- CHEKOL, T.; VOUGH, L. R. & CHANEY, R. L. Phytoremediation of polychlorinated biphenylcontaminated soils: the rhizosphere effect. **Environment International**, v. 30, n. 6, p. 799-804, 2004.
- COLE, M. A.; ZHANG, L.; LIU, X. Remediation of pesticide-contaminated soil by planting and compost addition. **Compost. Science & Utilization**, v. 3, p. 20-30, 1995.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução n° 460**, de 30 de dezembro de 2013. Brasília DF, n. 249, 2013.

CORCIOLI, G. **Indução de deficiências nutricionais em mudas de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.)**. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

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.

CUNNINGHAM, S.D. et al., Phytoremediation of soils contaminated with organics pollutants. **Advances Agronomy**. Newark, v. 56, p. 55 – 114, 1996.

DE FREITAS MUNIZ, Daphne Heloisa; OLIVEIRA-FILHO, Eduardo Cyrino. Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente. **Ciências da Saúde**, v. 4, n. 1 / 2, p. 83-100, 2006.

DIAS, Nivea Maria Piccolomini et al. Energia livre da reação de adsorção de cádmio em latossolos ácidos. **Ciência Rural**, v. 33, n. 5, p. 829-834, 2003.

DÍAZ, J.; BERNAL, A.; POMAR, F.; MERINO, F. Induction of shikimate dehydrogenase and peroxidase in pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings in response to copper stress and its relation to lignification. **Plant Science**, v. 161, p. 179-188, 2001.

ELTROP, L.; BROWN, G.; JOACHIM, O.; BRINKMANN, K. Lead tolerance of betula and salix in the mining area of Mechernich/Germany. **Plant and Soil**, 131:279-285, 1991.

FALESI, I. C.; BAENA, A. R. C. **Mogno-africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) em sistema silvipastoril com leguminosa e revestimento natural do solo**. Belém: Funtec, 52 p. 1999.

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

FERREIRA, M. M. A. A. S. **Toxidez de cádmio inibe o crescimento e altera a absorção de nutrientes do girassol**. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas). Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, 2013.

FORNAZIER, R. F. et al. Cadmium stress in sugar cane callus cultures: effect on antioxidant enzymes. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, New Jersey, v. 71, n. 2, p. 125-131, Feb. 2002.

FOY, C.D.; CHANEY, R.L.; WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, v.29, p.511-566, 1978.

FRANÇA, A. C. M. D. **Levantamento florístico e características anatômicas de espécies nativas do cerrado em solos contaminados por metais pesados**. Dissertação (Mestrado em ecologia aplicada). Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2011.

FRANÇOIS, M; GRANT, C; LAMBERT, R; SAUVÉ, S. Prediction of cadmium and zinc concentration in wheat grain from soils affected by the application of phosphate fertilizers varying in Cd concentration. **Nut. Cycl. in Agroec.**, 83 (2): 125-133, 2009.

GARBISU, C.; ALKORTA, I. Phytoextraction: a cost effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. **Bioresource Technology**, Essex, v. 77, n. 3, p. 229-236, May 2001.

GRANT,C.A. Influence of Phosphate Fertilizer on Cadmium in Agricultural Soils and Crops. **Pedologist**,143-155, 2011.

GROGAN, J.; BARRETO, P.; VERISSIMO, A. **Mogno na Amazônia brasileira: ecologia e perspectiva de manejo**. Belem: Imazon, 64 p. 2002.

GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J.; PIERANGELI, M. A. P.; ZULIANI, D. Q.; CAMPOS, M. L.; MARCHI, G. Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos. In: NOVAIS, R. F. de. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 4, p. 345-390, 2005.

GUIMARÃES, Marcelo de A. et al. Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. **Revista Trópica-Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 2, p. 58-68, 2008.

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.

HALL, J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, p. 1-11, 2002.

HERYATI, Y.; ABDU, A.; MAHAT, M.N.; ABDUL-HAMID, H.; JUSOP, S.; MAJID, N. M.; HERIANSYAH, I.; AJANG, L.; AHMAD, K. Comparing the Fertility of Soils under *Khaya*

ivorensis. Plantation and Regenerated Degraded Secondary Forests. **American Journal of Applied Sciences**, New York, v. 1, n. 5, p. 472-480, 2011.

JARUP, L. Hazards of heavy metal contamination. **British Medical Bulletin**, Edinburgh, v. 68, n. 1, p. 167-182, 2003.

JIANG, R.F.; MA, D.Y.; ZHAO, F.J.; McGRATH, S.P. Cadmium hyperaccumulation protects *Thlaspi caerulescens* from leaf feeding damage by thrips (*Frankliniella occidentalis*). **ew Phytologist**, v.167, p.805-814, 2005.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soil and plants**. 3rd ed. Boca Raton: CRC. 331 p, 2001.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soil and plants**. 2.ed. Florida: CRC Press, 365p.1992.

KHAN, A.G.; KUEK, C.; CHAUDHRY, T.M.; KHOO, C.S.; HAYES, N.J. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. **Chemosphere**, v. 41, p. 197–207, 2000.

KIRKHAM, M. B. Cadmium in plants on polluted soils: effects of soil factors hyperaccumulation, and amendments. **Geoderma**, Amsterdam, v. 137, n. 1/2, p. 19-32, Dec. 2006.

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*. **ew Phytologist**, p.1-20, 2007.

KURDZIEL, B.M.; PRASAD, M.N.V.; STRZALKA, K. Photosynthesis in heavy metal stressed plants. In: PRASAD, M.N.V. **Heavy metal stress in plants: From biomolecules to ecosystems**. 2nd ed. Springer, printed in India, p.146-181, 2004.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos**. Eschborn: (GTZ) Gmbh. Trad. Guilherme de Almeida Sedas e Gilberto Calcagnotto. 343 p, 1990.

LASAT, M. M.; KOCHIAN, L. V. Physiology of Zn hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens*. In: TERRY, N.; BAÑUELOS, G. (Ed.). **Phytoremediation of contaminated soil and water**. Boca Raton: Lewis Publishers, 2000. p.159-169.

LEMMENS, R. H. M. J. 2008. *Khaya ivorensis* A.Chev. [Internet] registro de Protabase.Loupe, 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 14 de fevereiro de 2017.

LIU, Y.; WANG, X.; ZENG, G.; QU, D.; GU, J.; ZHOU, M.; CHAI, L. Cadmium induced oxidative stress and response of the ascorbate–glutathione cycle in *Beckmeria nivea* (L.) Gaud. **Chemosphere**, v. 69, p. 99-107, 2007.

MACEK, T.; MACKOVÁ, M.; KÁS, J. Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation. **Biotechnology Advances**, v. 18, p. 23-34, 2000.

MALAVOLTA, E. **Fertilizantes e seu impacto ambiental, micronutrientes e metais pesados: mitos, mistificação e fatos**. São Paulo, ProduQuímica, 1994.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 638 p.2006.

MARIANO, D. C.; OKUMURA, R. S. Aspectos agronômicos, uso pelo homem e mecanismos da fitorremediação: uma revisão. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v.5, n. Edição Especial, p. 85-101, 2012.

MARQUES, T.C.L.L.S.M.; Moreira, A.M.S. e Siqueira, J.O. (2000) - Crescimento e teor de metais de mudas de espécies arbóreas cultivadas em solo contaminado com metais pesados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol. 35, n. 1, p. 121-132.

MARSCHNER, P.; GODBOLD, D. L.; JENTSCHKE, G. Dynamics of lead accumulation in mycorrhizal and nonmycorrhizal Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). **Plant and Soil**, The Hague, v. 178, n. 2, p. 239-245, Mar. 1996.

MERLINO, Luciana Cristina Souza et al. Bário, cádmio, cromo e chumbo em plantas de milho e em latossolo após onze aplicações anuais de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 2031-2039, 2010.

METWALLY, A.; Finkemeier, I.; Georgi, M. & Diezt, K-J. Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. **Plant Physiology** 132: 272-281, 2003.

MUNIZ, D. H. de F.; OLIVEIRA-FILHO, E. C. Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente. Universitas: **Ciências da Saúde**, Brasília, v. 4, p. 83-100, 2006.

MUNIZ, D. H. de F.; OLIVEIRA-FILHO, E. C. Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente-doi: 10.5102/ucs. v4i1. 24. **Universitas: Ciências da Saúde**, v. 4, n. 1, p. 83-100, 2008.

NASCIMENTO, C.W.A; AMARASIRIWARDENA, D.; XING, B. Comparison of natural organic acids and synthetic chelates at enhancing phytoextraction of metals from a multi-metal contaminated soil. **Environmental Pollution**, 2006. v.140, p.114-123.

OLIVEIRA, D. B.; CARA, D. V. C.; XAVIER, P. G.; SOBRAL, L. G. S.; LIMA, R. B.; ALMEIDA, A. L. **Fitorremediação: o estado da arte**. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 32 p. (Série Tecnologia Ambiental, 39). 2006.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. **Elementos traço na nutrição e saúde humana**. Genebra, 452 p.1998.

PAIVA, H. N.; CARVALHO, J. G.; SIQUEIRA, J. O. Efeito da aplicação de cádmio sobre o teor de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.). **Ciência Florestal**, v. 11, p. 153-162, 2001.

PEREIRA, G. J. G.; MOLINA, S. M. G.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Activity of antioxidant enzymes in response to cadmium in *Crotalaria juncea*. **Plant Soil**, v. 239, p. 123-132, 2002.

PHAENARK, C.; POKETHITIYOOK, P.; KRUATRACHUE, M.; NGERNSANSARUAY, C. Cd and Zn accumulation in plants from the Padaeng Zinc Mine area. **International Journal of Phytoremediation**, London, v. 11, n. 5, p. 479-495, July 2009.

PILON-SMITS, E. Phytoremediation. **Annual Review Plant Biology** 56: 15-39, 2005.

PILON-SMITS, E.A.H.; ZHU, Y.L.; SEARS, T.; TERRY, N. Overexpression of glutathione reductase in *Brassica juncea*: effects on cadmium accumulation and tolerance. **Physiologia Plantarum**, v.110, p.455-460, 2000.

PINHEIRO, A. L.; COUTO, L.; PINHEIRO, D. T.; BRUNETTA, J. M. F. C. **Ecologia, silvicultura e tecnologia de utilização dos mognos-africanos (*Khaya* spp.)**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Agrossilvicultura, 102 p, 2011.

PIO, M. C. S.; SOUZA, K. S.; SANTANA, G. P. Capacidade da *Lemna aequinoctialis* para acumular metais pesados de água contaminada. **Acta Amazônica**, 2013.

- PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; SILVA, A. A.; PROCÓPIO, S. O.; FERREIRA, L. R. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 335-341, maio/ago. 2003.
- POMBO, L. C. A. Absorção de metais pesados pelo azevém (*Lolium multiflorum*) em dois solos do Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 10, p. 1217-1224, out. 1995a.
- PRASAD, M. N. V.; MALEC, P.; WALOSZEK, A.; BOJKO, M.; STRZALKA, K. Physiological responses of *Lemna trisulca* L. (duckweed) to cadmium and copper bioaccumulation. **Plant Science**, v. 161, p. 881-889, 2001.
- RAMOS, I.; ESTEBAN, E.; LUCENA, J. J.; GÁRATE, A. Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of *Lactuca* sp. Cd-Mn interaction. **Plant Science**, v. 162, p. 761-767, 2002.
- RASKIN, I.; KUMAR, P. B. A. N.; DUSHENKOV, S.; SALT, D. E. Bioconcentration of heavy metals by plants. **Current Opinion Biotechnology**, London, v. 5, p. 285-290, 1994.
- RÖMKENS, P.F.A.M; BRUS, D.J; GUO, H.Y; CHU, C.L; CHIANG, C.M; KOOPMANS, G.F. Impact of model uncertainty on soil quality standards for cadmium in rice paddy fields. **Sci. Total Environ.**, 409: 3098–3105. 2011.
- SANITÁ DI TOPPI, L.; GABRIELLI, R. Response to cadmium in higher plants. **Environmental of Experimental Botany**, v. 41, p. 105-130, 1999.
- SANTOS NETO, A. P. **Crescimento inicial de mogno africano (*khaya* spp.) sob diferentes condições microclimáticas associadas à disponibilidade hídrica**. Dissertação (Mestrado Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo monteiro 2014.
- SCHÜTZENDÜBEL, A.; POLLE, A. Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, p. 1351-1365, 2002.
- SCHÜTZENDÜBEL, A.; SCHWANZ, P.; TEICHMANN, T.; GROSS, K.; LANGENFELD-HEYSER, R.; GODBOLD, D. L.; POLLE, A. Cadmium-induced changes in antioxidative systems, hydrogen peroxide content, and differentiation in scots pine roots. **Plant Physiology**, v. 127, p. 887-898, 2001.

SCHÜTZENDÜBEL, A.; Schwanz, P.; Teichmann, T.; Gross, K.; Langenfeld- Heyser, R.; Godbold, D.L. & Polle, A. Cadmium-induced changes in antioxidative systems, hydrogen peroxide content, and differentiation in scots pine roots. **Plant Physiology** 127: 887-898, 2001.

SHAH, K.; KUMAR, R. G.; VERMA, S.; DUBEY, R. S. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. **Plant Science**, v. 161, p. 1135- 1144, 2001.

SILVA, J. F. D. **Prospecção de plantas fitorremediadoras em solos contaminados por metais pesados**. Tese (Doutorado em biotecnologia). Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2012.

SOUZA, E. P.; SILVA, I. F.; FERREIRA, L. E. Mecanismos de tolerância a estresses por metais pesados em plantas. **Current Agricultural Science and Technology**, 2011.

SOUZA, V. L.; SILVA, D. C. da; SANTANA, K. B.; MIELKE, M. S.; ALMEIDA, A. A. F. de; MANGABEIRA, P. A. O.; ROCHA, E. A. Efeitos do cádmio na anatomia e na fotossíntese de duas macrófitas aquáticas. **Acta Botânica Brasílica**, v. 23, n. 2, p. 343-354, 2009.

SURESH, B.; RAVISHANKAR, G. A. Phytoremediation-a novel and promising approach for environmental clean-up. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 24, p. 97- 124, 2004.

TORRES, K. C.; JOHNSON, M. L. Bioaccumulation of metals in plants, arthropods, and mice at a seasonal wetland. **Environmental Toxicology and Chemistry**, New York, v. 20, n. 11, p. 2617-2626, Nov. 2001.

UTSUNAMYIA, T. Japanese Patent Application No. 55-72959. L.W. Neuteboom, J.E. Pinas, A.N. Chardonnens, H. Schat, J.A.C. Verkleij, P.J.I. Hoykass. 1999. Overexpression of a novel Arabidopsis gene related to putative zinc transporter genes from animals can lead to enhanced zinc resistance and accumulation. **Plant Physiol.** 119:1047–1056, 1980.

VECCHIA, F.D.; La Rocca, N.; Moro, I.; De Faveri, S.; Andreoli, C. & Rascio, N. Morphogenetic ultrastructural and physiological damages suffered by submerged leaves of *Elodea canadensis* exposed to cadmium. **Plant Science** 168: 329-338, 2005.

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.

VOSE, J. M. et al. Leaf water relations and sapflow in Eastern cottonwood (*Populus deltoides* Bartr.) trees planted for phytoremediation of a groundwater pollutant. **International Journal of Phytoremediation**, v. 2, p. 53-73, 2000.

YEUNG, A. T.; HSU, C. N. Electrokinetic remediation of cádmium contaminated clay. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v. 131, n. 2, p. 298-304, Feb. 2005.

ZANCHETA A. C. F. **Seleção de plantas em solução nutritiva para fitoextração de cádmio, cobre e zinco.** Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical). Instituto Agronômico, São Paulo, Campinas, 2010.

FITORREMEDIAÇÃO DE CÁDMIO POR *Khaya ivorensis* A. Chev. MODULAÇÕES FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS.

1. INTRODUÇÃO

Atividades antropogênicas como a mineração, a combustão de fósseis, as atividades industriais, a utilização de fertilizantes à base de fósforo, etc, resultam no ingresso e, conseqüentemente, na acumulação de metais pesados no ecossistema. Estima-se que a introdução antropogênica de cádmio no meio ambiente chega a 30.000 toneladas por ano, enquanto que em solos não contaminados, as concentrações são de 0,1 a 0,5 mg kg⁻¹ (WU et al., 2001; SCHÜTZENDÜBEL e POLLE, 2002; BIZARRO et al., 2008).

O cádmio é um metal pesado sem função biológica conhecida, com alta toxicidade para plantas e animais (DONG et al., 2007), um problema que afeta a produtividade das culturas em todo o mundo. Segundo Iha (2014), acumula-se em solos e bacias hidrográficas sob certas condições (e.g. pH, precipitação pluviométrica, composição química do solo, atividades agrícolas). É tóxico para a maioria das plantas em concentrações superior a 5-10 µg Cd g⁻¹ MS folha (LUX et al., 2010), causando estresse em muitos processos fisiológicos da planta, incluindo o metabolismo do nitrogênio, fotossíntese, metabolismo de carboidratos, assimilação de minerais e as relações hídricas da planta (GAJDOS et al., 2012), ocasionando inibição do crescimento da parte aérea, nanismo, clorose, necrose de pontas de meristemas, coloração amarronzada das nervuras das folhas e epinastia (DAS et al., 1997; BENAVIDES et al., 2005; SMEETS et al., 2005).

Pesquisas envolvendo a utilização de plantas em estratégias de fitorremediação têm aumentado nos últimos anos, sendo esta considerada uma alternativa emergente na recuperação de áreas contaminadas (KAVAMURA e ESPOSITO, 2010; PAQUIN et al., 2004; XIAO et al., 2008;). A técnica prevê vários mecanismos de despoluição, sendo que para áreas contaminadas com elementos-traço destaca-se a fitoestabilização e a fitoextração (BORIN, 2010).

A fitoextração consiste na absorção e acumulação de elementos-traço na parte aérea de plantas (SANTOS et al., 2006). Segundo Lasat (2002), o potencial depende da interação entre solo, metal, planta e microrganismos de solo. Para que haja sucesso da técnica é necessário que a planta apresente tolerância a elevados níveis de toxidez, acumular grandes quantidades de metal na parte aérea, ter alta taxa de crescimento, produzir muita biomassa e ter sistema radicular abundante (GARBISU e ALKORTA, 2001; VASSILEV et al., 2002).

Estudos com esse enfoque são pouco conhecidos nas condições brasileiras, onde a contaminação do solo e a existência de áreas degradadas pelo excesso de metais são cada vez mais abundantes, portanto, o conhecimento de espécies lenhosas com potenciais para fitorremediação dessas áreas se reveste da maior importância. Pois, culturas alimentares tolerantes, quando expostas aos metais no seu crescimento, são perigosas, tornando-se transportadoras de substâncias tóxicas e que ao entrar na cadeia alimentar poderiam causar intoxicações (GOLAN-GOLDHIRSH, 2006). Sendo que a alimentação, é a principal forma de exposição ao cádmio, o que pode aumentar o risco de contaminação futura por alimentos devido a biomagnificação (IHA, 2014). Tendo em vista a estreita margem de segurança, todos os esforços devem ser feitos para reduzir as concentrações de cádmio no ambiente (WHO, 2007).

Segundo Marchiol et al. (2004), com o objetivo de facilitar o entendimento da absorção de metais em plantas acumuladoras e tolerantes, experimentos em solução nutritiva têm sido realizados, pois este sistema tem sido uma ferramenta para determinar a eficiência de absorção e a tolerância a metais pesados em espécies com potencial de fitorremediação. Acredita-se que a espécie *khaya ivorenses* seja promissora na técnica com o elemento cádmio, pois, pesquisas com as espécies *Cedrela fissilis* VELL (PAIVA, 2002) e *Swietenia macrophylla* (FAN et al., 2011) que pertencem à mesma família botânica, obtiveram sucesso na translocação e tolerância a este metal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Material vegetal e condições de cultivo

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA, em Belém-Pa, com coordenadas geográficas de 01° 27' 21" S, 48° 30' 16" W e altitude média de 10 m. A classificação do clima é Af segundo Köppen e Geiger com temperatura média de 26.8 °C e umidade relativa do ar de 95%, no período de Dezembro de 2016 a Maio de 2017.

Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), sendo 5 tratamentos (Controle, CdCl₂ 10 mg/L, CdCl₂ 20 mg/L, CdCl₂ 30 mg/L e CdCl₂ 40 mg/L) com 7 repetições cada (uma planta/vaso), totalizando 35 unidades experimentais. As concentrações de cádmio foram definidas com base no comportamento de mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla*), em experimentos realizados por Fan et al. (2011), e valores orientadores do CONAMA n° 460/2013, para solos contaminados por cádmio.

As mudas foram provenientes do viveiro São Francisco, localizado em Castanhal-PA, com idade de aproximadamente 90 dias, em bom estado fitossanitário e homogêneas. Permaneceram na casa de vegetação durante 35 dias aclimatando.

2.2. Transplântio e solução nutritiva

No 35° dia após a aclimação, foi realizado o transplântio para vasos de Leonard com capacidade de 4,6 L adaptados e envolvidos com papel alumínio (para minimizar a interferência da radiação solar no crescimento radicular) (Figura 1), contendo areia lavada e autoclavada. Foi colocada na borda de cada vaso, papel e.v.a em forma de círculos, para evitar a proliferação de algas (Figura 2). Os vasos continham solução de Sarruge (1975) (Tabela 1), com ¼ de força iônica. Após 16 dias de adaptação, foi iniciada a aplicação das concentrações de cádmio na forma de cloreto de cádmio, CdCl₂.H₂O. As soluções foram renovadas semanalmente e o pH mantido entre 5,8 a 6,0 com adição de NaOH ou HCl 0,1 mol L⁻¹, quando necessário o ajuste.

Figura 1. Vasos adaptados com papel alumínio.



Fonte: O autor



Figura 2. Papel E.V.A para evitar a proliferação de algas na areia.

Fonte: O autor

Tabela 1. Composição da solução nutritiva.

COMPOSIÇÃO	CONCENTRAÇÃO	mL/ L
KNO₃	1M	5
KH₂PO₄	1M	0,5
MgSO₄.7 H₂O	1M	1
Ca (NO₃)₂.4 H₂O	1M	2,5
Fe (EDTA):		1
a) FeSO₄.7 H₂O	0,1 M	
b) Na₂ (EDTA)	0,08 M	
Micronutrientes:		1
a) H₃BO₃	0,04 M	
b) MnCl₂.4 H₂O	0,009 M	
c) CuSO₄.5 H₂O	0,003 M	
d) ZnSO₄.7 H₂O	0,007 M	
e) Na₂MoO₄.2 H₂O	0,001 M	

2.3. Coleta e armazenamento do material

As plantas foram mantidas por 60 dias em exposição ao metal pesado, com renovação de solução nutritiva a cada 7 dias. Após este período as plantas foram retiradas, e então, lavadas em água destilada e posteriormente medidas e separadas em folha, caule e raiz. Em seguida o material foi levado à estufa de ventilação de ar forçada a 65°C por 48 h. O peso da matéria seca foi determinado em balança de precisão que em seguida foi moída em moinho tipo Wiley equipado com peneira de malha 0,38 mm, sendo devidamente armazenado em tubos de falcon até sua utilização nos ensaios das análises bioquímicas. Parte do material seco foi levado para o Museu Paraense Emílio Goeldi para análise da concentração de Cd^{+2} , nas folhas, caules e raízes.

2.4. Variáveis Ecofisiológicas

A taxa fotossintética líquida, condutância estomática, transpiração, temperatura da folha (Tfol), concentração interna de CO_2 e a eficiência do uso da água foram avaliadas através medidor portátil IRGA (Infra-red Gas Analyser/ADC equipments - mod. LCi 6400, Hoddesdon, UK) sendo medidas sob condições ambientais favoráveis, entre as 9:00 e 11:00 da manhã. As avaliações foram feitas em todas às plantas de todos os tratamentos (n=35), sendo um folíolo por planta colocada dentro da câmara, sempre na região mediana da folha totalmente expandida (Figura 3).

2.5. Variáveis Biométricas

A variável altura foi obtida com a utilização de régua centimétrica, da base do coleto à gema apical das plantas (Figura 4). O DAC (diâmetro à altura do colo) foi realizado com auxílio de paquímetro digital modelo ZAAS precision (Figura 5) e o número de folhas por planta realizada por contagem manual.

A biomassa da parte aérea e da raiz foram medidas no ato de cada coleta destrutiva, onde as plantas foram separadas em suas respectivas partes. A biomassa após secagem em estufa de circulação forçada, a 70 °C por 72 horas, foi utilizada para determinar a massa seca da raiz e massa seca da parte aérea e a relação raiz/parte aérea em balança analítica de precisão. O material seco, foi posteriormente reservado em tubos de falcon e utilizados nos ensaios bioquímicos, realizados no Laboratório de Estudo da Biodiversidade em Plantas Superiores (EBPS), localizado na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), ICA, Belém, Pará.

Figura 5: Medição caulinar com auxílio de paquímetro



Fonte: O autor.

Figura 3: Trocas gasosas verificadas com o IRGA



Fonte: O autor.

Figura 4: Medição da altura com auxílio de régua centimétrica.



Fonte: O autor.

2.6. Variáveis Bioquímicas

2.6.1. Carboidratos Solúveis Totais

Para a extração, foram colocados em tubos de ensaio 20 mg de pó da matéria seca (MS), adicionando em seguida 2,5 mL de etanol (C_2H_6O) 80%. As amostras foram ao banho-maria durante 1h a 75 °C, com agitações a cada 15 min. O material é centrifugado e o sobrenadante coletado. Todo este processo é realizado duas vezes, reunindo assim um extrato total com volume a ser completado para 10 mL com etanol 80%.

Adicionou-se aos tubos de ensaio comuns 200 μ L do extrato, 200 μ L de fenol 5% e 1,0 mL de ácido sulfúrico concentrado; O H_2SO_4 é adicionado rapidamente e o fluxo direcionado diretamente contra a superfície da solução e não contra a parede do tubo de ensaio, para que seja obtida uma boa mistura; Agita-se os tubos em agitador de tubos e em seguida repouso em bandeja contendo água à temperatura ambiente (25 °C) por 10 a 20 min; As leituras foram realizadas em espectrofotômetro à 490 nm, tendo como “branco” um tubo de ensaio contendo 200 μ L de etanol 80 %, 200 μ L de fenol 5% e 1,0 mL de ácido sulfúrico concentrado. O método empregado é o preconizado por DUBOIS et al. (1956), com adaptações feitas pelo Laboratório de Estudos da Biodiversidade de Plantas Superiores (2017).

2.6.2. Amido

Para a extração, foram colocados em tubos de ensaio 20 mg de pó da matéria seca (MS), adicionando em seguida 2,5 mL de etanol (C_2H_6O) 80%. As amostras foram ao banho-maria durante 1h a 75 °C, com agitações a cada 15 min. O material foi centrifugado e o sobrenadante coletado. Todo este processo é realizado duas vezes, reunindo assim um extrato total com volume a ser completado para 10 mL com etanol 80%.

O precipitado resultante da obtenção do extrato é utilizado para determinar os teores de amido. Assim, adicionou-se ao precipitado 2 mL de ácido perclórico ($HClO_4$) a 30%. Segue-se agitação por 20 min e adição de 1,65 mL de H_2O desionizada em cada tubo; O extrato é centrifugado e o sobrenadante coletado. Todo o processo de extração é realizado mais duas vezes, reunindo um extrato total sendo completado até 25 mL com H_2O desionizada em balão volumétrico.

Adicionou-se aos tubos de ensaio comuns 0,5 mL do extrato e 2,5 mL de antrona, tampando os tubos e aquecendo a 95°C por 10 min.

As leituras foram realizadas em espectrofotômetro à 620 nm, tendo como branco 0,5 mL de ácido perclórico a 6,9% (v/v) (em substituição ao extrato), e 2,5 mL de antrona a 0,14%. O método empregado é o preconizado por Hodge e Hofreiter (1962).

2.6.3. Sacarose

Amostras de 50 mg de massa seca e em pó foram homogeneizadas em 1,5 mL de solução de MCW (metanol:clorofórmio:água 12:5:3 v/v/v) durante 30 min sob agitação em tubos de eppendorf de 2,0 mL; O homogeneizado é centrifugado a 10000 rpm por 10 min, coletado o sobrenadante e o resíduo extraído novamente com igual volume de MCW, seguindo-se nova centrifugação e coleta do sobrenadante; Os sobrenadantes são reunidos para obtenção do extrato total.

A cada 2,0 mL do sobrenadante adiciona-se 0,5 mL de clorofórmio e 750 µL de água deionizada, seguindo-se agitação e centrifugação (2000 rpm, 10') para a separação da fase aquosa, em seguida, retirou-se com a pipeta de Pasteur a fração aquosa metanólica (superior) e transfere-se para tubos de ensaio; Os tubos com a fração aquosa metanólica são levados ao banho-maria para serem aquecidos a 35 °C por volta de 30 a 60 min para evaporação do clorofórmio residual e então determina-se o volume restante.

Da fase aquosa metanólica obtida anteriormente são tomadas alíquotas para as dosagens de sacarose segundo Van Handel, com algumas modificações: A cada alíquota de 100 µL da fase aquosa adequadamente diluída (fazer teste de diluição) adiciona-se 100 µL de KOH 30 %. Seguindo agitação; A mistura é aquecida à 100 °C por 10 min e, após resfriamento, adicionou-se 3,0 mL de solução de antrona 0,2 % em ácido sulfúrico; A mistura é agitada e aquecida a 40 °C por 20 min. Após resfriamento, agita-se as amostras por 10 seg e as leituras são realizadas em espectrofotômetro a 620 nm. O método empregado é o preconizado por Van Handel (1968).

2.6.4. Glicina-betaína

Para a extração da glicina-betaína, é transferida 25 mg de massa seca (MS) para tubos eppendorfs de 2 mL, adicionando 2 mL de água destilada e agitação por 4 h no shaker a 25 °C (extração a frio); Centrífuga à 10.000 rpm por 10 min a 25 °C; Após a centrifugação o sobrenadante é coletado para obtenção do extrato aquoso e descarta-se o precipitado.

Em eppendorfs de 2 mL adiciona-se 250 µL do extrato aquoso + 250 µL de H₂SO₄ 2N (diluição da amostra 1:2); Os eppendorfs permaneceram durante 1h no banho de gelo (na geladeira - de 0o a 4o C); Em seguida, adiciona-se 200 µL de KI-I₂ gelado; período de 16 h a 0 °C (banho de gelo na geladeira – 0° a 4 °C); Centrífuga durante 15 min, 10.000 rpm, 0 °C. Descarta-se o sobrenadante; Lava-se o precipitado 2 vezes com 2 mL de H₂SO₄ 1N gelado com centrifugações por 5 min, 10.000 rpm, 0 °C a cada lavagem; Após as lavagens, dissolve-se o precipitado em 3 mL de 1,2-dicloroetano agitando vigorosamente; Após 2 a 2,5 h de descanso, é realizada a leitura em espectrofotômetro à 365 nm. O método empregado é o preconizado por Grieve e Grattan (1983).

2.6.5. Prolina

São colocados em eppendorfs de 2 mL 2 mg de pó da matéria seca (MS) das raízes e das folhas, adicionando 2mL de H₂O destilada homogeneizando em agitador e banho maria por 30 min à 100 °C. Após este processo, os tubos são centrifugados em centrífuga de bancada (2500 rpm por 5 min.). É colocado em cada microtubo, 400 µL de mix de reação, 400 µL ácido acético a 100% e 400 µL de extrato, seguindo de agitação e incubação a 100°C por 60 min. Em seguida a reação é paralizada com choque térmico usando água e gelo. Adiciona-se 800 µL de tolueno a 100 % e agita-se vigorosamente por 30 seg. As amostras são mantidas em temperatura ambiente por 20 min. As leituras são realizadas em espectrofotômetro a 520 nm. Descarta-se a fase não aquosa (parte superior). O branco é feito somente com tolueno a 100%. O método empregado é o preconizado por BATES; WALDREN e TEARE (1973), com adaptações feitas pelo laboratório de Estudos da Biodiversidade em Plantas Superiores (2017).

2.7. Análise de Cádmio.

A metodologia utilizada foi a descrita no "Manual de Análises Químicas de Plantas, Solos e Fertilizantes" do Cap. "Análise Química de Tecido Vegetal" adaptado da Embrapa, onde utilizou-se a digestão úmida com $\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$ (3:1) em bloco digestor. Foi pesado 0,5 g do material triturado, transferido para um tubo digestor, adicionados 8 mL de uma solução $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$ (3:1) e deixado digerindo a frio durante a noite. Posteriormente, elevou-se a temperatura do bloco digestor para 120 °C até o total desprendimento do vapor castanho e depois a 200 °C até o total desprendimento do vapor branco. Deixou-se esfriar. Após a digestão, a solução do tubo foi filtrada e aferida até a marca em balão volumétrico de 50 mL com água deionizada. As amostras foram digeridas em triplicata (1, 2 e 3) e o branco analítico foi preparado pelo mesmo método sem adição da amostra. A composição mineral foi determinada a partir desta solução no Laboratório de Análises Químicas do Museu Paraense Emílio Goeldi utilizando-se um espectrômetro de absorção atômica de chama da marca Thermo, modelo ICE3000.

2.7.1. Cálculo do FB, FT e dose crítica de toxidez

A mensuração do fator de bioacumulação (FB) e do fator de translocação (FT), são definidos como a concentração do elemento na planta em relação à concentração do elemento no solo e concentração do elemento na parte aérea em relação à concentração do elemento nas raízes, respectivamente. Como o experimento foi realizado em solução nutritiva utiliza-se, para os cálculos, as concentrações dos elementos presentes em solução, conforme fórmulas abaixo:

Fator de bioacumulação:

$$FB = \frac{[Cd]_{planta}}{[Cd]_{solução}}$$

Fator de translocação:

$$FT = \frac{[Cd]_{parte\ aérea}}{[Cd]_{raíz}}$$

Onde $[Cd]_{\text{planta}}$ é a $[Cd]_{\text{parte aérea}} + [Cd]_{\text{raízes}}$, que representam a concentração do elemento na parte aérea e nas raízes, respectivamente ($\mu\text{g g}^{-1}$), enquanto $[Cd]_{\text{solução}}$ é a concentração do elemento em solução nutritiva (mg L^{-1}) (SHAH et al., 2008; MARCHIOL et al., 2004).

Os níveis críticos de toxidez de Cd na solução nutritiva (concentração do elemento que reduz em 50% a produção de matéria seca da parte aérea e raízes) são estimados com base nas equações de regressão obtidas em cada espécie, em resposta às concentrações do elemento em solução.

2.8. Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística, utilizando-se análise de variância (ANOVA) no programa Sisvar versão 5.4 e, as médias comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Variáveis Ecofisiológicas

3.1.1. Condutância estomática

Para (g_s), foi observado uma diminuição em função das doses de CdCl_2 , quanto maior a dose aplicada nos tratamentos menor foi o grau de abertura dos estômatos (Tabela 2). Apresentando como resultados médios de $9,30 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$; $12,52 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$; $26,29 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$; $54,95 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e $145,26 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para os tratamentos com as doses de 40, 30, 20, 10 e 0 de $\text{CdCl}_2 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente. Quando comparado do valor médio de g_s do tratamento controle com os demais, observou-se redução de 62% para o T10; 82% para T20, 91% para T30 e 94% para T40.

Tabela 2. Valores médios de condutância estomática (g_s), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.

Doses de CdCl_2 (mg L^{-1})	0	10	20	30	40
g_s ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	145,26 ^a	54,95 ^b	26,29 ^c	12,52 ^{cd}	9,30 ^d

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A redução da condutância estomática pode estar relacionada com os efeitos na inibição da incorporação de nitrato e do potássio, que estão associados à abertura e fechamento dos estômatos (GOMES et al., 1998). O Cd induz a liberação de cálcio do retículo endoplasmático e do vacúolo, aumentando, assim, sua concentração no citosol (GUIMARÃES et al., 2008), o que seria a principal causa da redução da condutância estomática (ALMEIDA, 2015).

Quando não há aumento da densidade estomática, a diminuição do tamanho das células estomáticas pode contribuir na redução das características das trocas gasosas, devido ao aumento da resistência à difusão de CO_2 para dentro da folha (SHI; CAI, 2009). Cupertino (2006), ao trabalhar com doses crescentes de cádmio em *Hevea brasiliensis*, relata que, quando foi realizada a contagem de estômatos nos tratamentos, foi observada redução na quantidade, em função da aplicação do metal pesado. Ahmad et al.,(2005), Macedo (2011), Pereira (2013). Verificaram que a condutância estomática reduziu em função da aplicação de cádmio, sendo este comportamento também observado neste trabalho.

3.1.2. Fotossíntese

Ocorreu decréscimo na taxa fotossintética em plantas de *Khaya ivorenses* com o aumento das doses de cloreto de cádmio, onde, os tratamentos com menor exposição ao metal obtiveram os maiores valores (Tabela 3). Exibindo como resultado médio para os tratamentos controle, 10, 20, 30 e 40 CdCl_2 mg L^{-1} os valores de $12,49 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; $7,71 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; $4,78 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; $2,34 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e $1,03 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, respectivamente. Quando se compara valor médio de *A* do tratamento controle com demais, observou-se redução de 38% para o T10; 62% para T20, 81% para T30 e 92% para T40.

Tabela 3. Valores médios de fotossíntese (*A*), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.

Doses de CdCl_2 (mg L^{-1})	0	10	20	30	40
<i>A</i> ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	12,49 ^a	7,71 ^b	4,78 ^c	2,34 ^d	1,03 ^d

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A redução na taxa fotossintética pode ter ocorrido devido aos efeitos do cádmio na inibição da fotossíntese pela dissipação da energia na forma de calor, impedindo assim, que a energia seja absorvida nos centros de reação do fotossistema II (FAGIONI et al., 2008; PARMAR et al., 2014). E na etapa bioquímica da fotossíntese, as enzimas rubisco tem sua atividade fortemente afetada pela atuação do Cd (WANG et al., 2009).

De acordo com Mendelsohn et al. (2001) a atividade fotossintética decresce significativamente com o aumento da concentração de Cd, sendo considerada como um indicador sensível do estresse ocasionado por este metal.

Kurdziel et al. (2004), relata que esta redução da fotossíntese pode ser devida a inibição da cadeia de transporte de elétrons do cloroplasto e inibição de enzimas do Ciclo de Calvin, e Kupper et al. (2007) afirma que é devido a redução da concentração de clorofila. Chugh e Sawhney (1999) em estudos realizados com *Pisum sativum* L. evidenciaram que o Cd exerceu um efeito deletério sobre as enzimas fotossintéticas e fotossíntese, diminuindo progressivamente com aumento da concentração deste metal. Também corroboram com este trabalho, Burzynski e Klobus (2004), Cupertino (2006) e Souza (2009).

3.1.3. Transpiração

Com o aumento das doses de CdCl_2 ocorreu declínio da condutância estomática, sabendo que esta é a principal responsável pela entrada e saída de gases na planta, os resultados para Transpiração (*E*) apresentaram tendência similar a *g_s* (Tabela 2). Exibindo valor médio de

3,18 mmol m⁻²s⁻¹; 1,58 mmol m⁻²s⁻¹; 0,87 mmol m⁻²s⁻¹; 0,40 mmol m⁻²s⁻¹ e 0,17 mmol m⁻²s⁻¹, para controle, 10, 20, 30 e 40 CdCl₂ mg L⁻¹, respectivamente. Quando comparado do valor médio de *E* do tratamento controle com demais, observou-se redução de 50% para o T10; 73% para T20, 87% para T30 e 95% para T40.

Tabela 4. Valores médios de Transpiração (*E*), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.

Doses de CdCl ₂ (mg L ⁻¹)	0	10	20	30	40
<i>E</i> (mmol m ⁻² s ⁻¹)	3,18 ^a	1,58 ^b	0,87 ^c	0,40 ^d	0,17 ^d

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O Cd altera as taxas de absorção líquida de CO₂, a transpiração e a condutância estomática (PRASAD, 1995). Os estômatos estão intimamente relacionados com os processos de fotossíntese e transpiração na planta, pois essas células exercem um papel chave, tanto na regulação da perda de água, quanto na entrada de CO₂ no mesofilo (PEREIRA, 2013). Dessa forma, é assumido que os estômatos fornecem o principal controle em curto prazo para a transpiração (JONES, 1998). Corroboram com estes resultados Oliveira et al. (1994) e D'Alessandro et al. (2013).

3.1.4 Concentração Interna de CO₂

Na avaliação dos valores da concentração interna de CO₂ (*C_i*), os resultados seguiram o teor do metal nos tratamentos, ou seja, quanto maior a dose de CdCl₂ aplicada, menor foi a *C_i* nas plantas (Tabela 5). Assim, os valores médios nos tratamentos foram de 239,37 μmol m⁻²s⁻¹ para o controle; 157,77 μmol m⁻²s⁻¹ para T10; 113,02 μmol m⁻²s⁻¹ para T20; 96,71 μmol m⁻²s⁻¹ para T30 e 85,48 μmol m⁻²s⁻¹ para T40. Quando comparado do valor médio final de *C_i* do tratamento controle com demais, observou-se redução de 34% para o T10; 53% para T20, 60% para T30 e 64% para T40.

Tabela 5. Valores médios de Concentração interna de CO₂ (*C_i*), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.

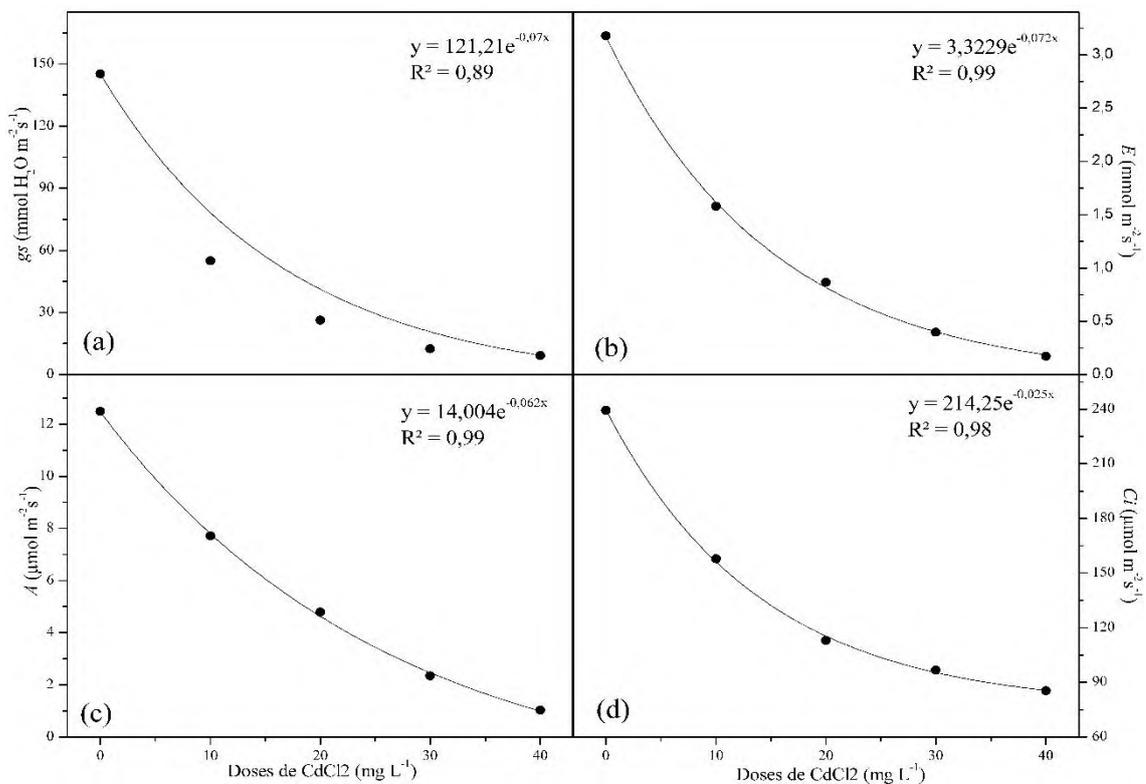
Doses de CdCl ₂ (mg L ⁻¹)	0	10	20	30	40
<i>C_i</i> (μmol m ⁻² s ⁻¹)	239,37 ^a	157,77 ^b	113,02 ^c	96,71 ^c	85,48 ^c

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A diminuição da taxa de assimilação de CO₂ ao longo do estresse provocado pelo metal pode ser atribuída à redução da disponibilidade de CO₂ no interior da folha, provocada pelo fechamento estomático, em resposta a toxicidade causada pelo cádmio. Segundo Nascimento

(2009), habitualmente, o aumento nos valores de C_i é acompanhado de acréscimos na g_s (Figura 6 (a)), assim, a limitação estomática seria o principal fator da limitação do desempenho fotossintético, pois quanto maior a abertura estomática maior a difusão de CO_2 para a câmara subestomática. Nessas condições ocorre o aumento da atividade da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase-oxigenase (rubisco) aumentando com isso o consumo de CO_2 (MACHADO et al., 2005).

Figura 6: Valores médios de condutância estomática (g_s) (a), transpiração (E) (b), Fotossíntese (A) (c) e Concentração interna de CO_2 (C_i) (d), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.



3.1.5 Temperatura foliar

Além de ser a principal responsável pelas trocas gasosas, a condutância estomática, possui função de regulação térmica das folhas, logo, com a redução da g_s em função do aumento das doses de CdCl_2 ocorreu um aumento da temperatura foliar (T_f) nos tratamentos em que as plantas tiveram maior exposição ao metal (Tabela 6). Apresentando como resultados médios 38,53 °C; 38,02 °C; 37,55 °C; 36,51 °C e 34,93 °C para os tratamentos com as doses de 40, 30, 20, 10 e 0 de CdCl_2 mg L⁻¹, respectivamente. Quando comparado ao valor médio de T_f do

tratamento controle com demais, observou-se um aumento de 1,58 °C para o T10; 2,62 °C para T20, 3,09 °C para T30 e 3,60 °C para T40.

Tabela 6. Valores médios de temperatura foliar (*T_f*), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.

Doses de CdCl ₂ (mg L ⁻¹)	0	10	20	30	40
<i>T_f</i> (°C)	34,93 ^a	36,51 ^{ab}	37,55 ^{bc}	38,02 ^{bc}	38,53 ^c

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Com a diminuição da condutância estomática para evitar a perda de água através da transpiração, causou o aumento da temperatura foliar, onde podemos observar que esta variável mostrou ter relação direta com a eficiência do uso da água, de que quanto maior a eficiência, há a elevação da temperatura foliar em resposta da planta ao estresse causado pelas doses crescentes de cádmio. Segundo Rocha (2013), a elevação da temperatura foliar em resposta ao estresse pode ser explicada pela redução na perda de calor latente através da transpiração que normalmente sofre redução nestas condições (Tabela 4).

3.1.6 Eficiência do uso da água

Ao oposto das demais variáveis fisiológicas analisadas, a Eficiência no uso da água em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a doses de cloreto cádmio, mostrou que quanto maior a dose aplicada maior foi o resultado obtido (Tabela 7). Apresentando como resultados médios 6,01; 5,86; 5,69; 4,95 e 3,93 para os tratamentos com as doses de 40, 30, 20, 10 e 0 de CdCl₂ mg L⁻¹, respectivamente. Quando comparado do valor médio da EiUA do tratamento controle com demais, observou-se aumento de 26% para o T10; 45% para T20, 49% para T30 e 53% para T40.

Tabela 7. Valores médios da Eficiência no uso da água (EiUA), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.

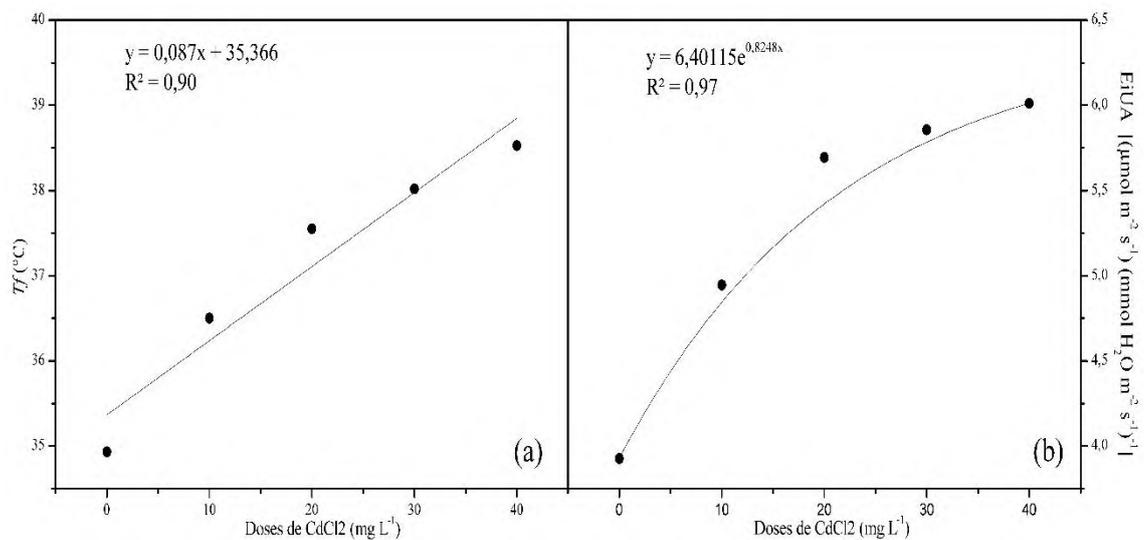
Doses de CdCl ₂ (mg L ⁻¹)	0	10	20	30	40
EiUA [(μmol m ⁻² s ⁻¹) (mmol H ₂ O m ⁻² S ⁻¹)]	3,93 ^c	4,95 ^b	5,69 ^{ab}	5,86 ^{ab}	6,01 ^a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

De acordo com Zhao (2004), a EUA instantânea ou intrínseca é definida em termos fisiológicos como a razão estabelecida entre a taxa de fixação de carbono e a taxa de transpiração (A/E). Assim, a maior EUA observada foi no tratamento com a dosagem de 40 mg/L, o que pode ser atribuída principalmente a sua baixa taxa de transpiração (Tabela 4), uma

vez que sua taxa de assimilação de CO₂ não foi superior aos demais (Tabela 5). Este comportamento sugere que a eficiência de uso da água não apresenta boa correlação com a taxa de assimilação de CO₂, demonstrando que a taxa de assimilação de CO₂ tende a reduzir com a elevação da eficiência de uso da água. A correlação estabelecida entre a EUA e a gs, demonstra que o aumento da gs promove a redução da EUA. Bem como relatado por Prasad (1995), que afirma que o Cd altera as taxas de absorção líquida de CO₂, a transpiração, a condutância estomática e a eficiência do uso de água.

Figura 7: Valores médios de temperatura foliar (*T_f*) (a) e Eficiência do uso da água (EiUA) (b), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.



3.2 Variáveis biométricas

3.2.1 Altura da planta, diâmetro caulinar e número de folhas.

Os parâmetros Altura da planta (*Ap*), diâmetro caulinar (*Dc*) e número de folíolos (*Nf*), apresentaram diminuição dos seus valores médios em função das crescentes doses, (Tabela 8). Na *Ap* a redução foi de 10,89%, 12,72%, 14,44% e 20,89%; no *Dc* as reduções foram de 16,74%, 20,06%, 22,92% e 24,46%; e em *Nf* o declínio apresentou 24,39%, 30,31%, 33,25% e 35,39%, para os tratamentos com 10, 20, 30 e 40 CdCl₂ em relação ao controle.

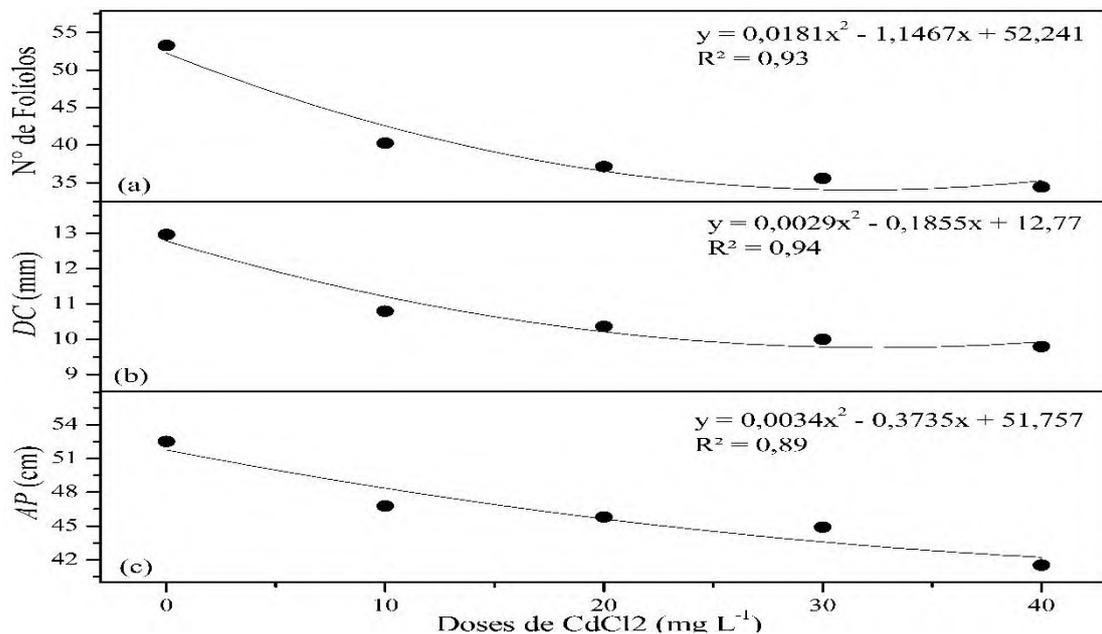
Tabela 8. Valores médios da altura da planta, diâmetro caulinar e número de folhas em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio

Doses de CdCl ₂ (mg L ⁻¹)	0	10	20	30	40
Altura da planta (cm)	52,51 ^a	46,79 ^{ab}	45,83 ^{ab}	44,93 ^b	41,54 ^b
Diâmetro caulinar (mm)	12,96 ^a	10,79 ^b	10,36 ^b	9,99 ^b	9,79 ^b
Número de folíolos	53,29 ^a	40,29 ^b	37,14 ^b	35,57 ^b	34,43 ^b

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A menor abertura estomática pode reduzir a disponibilidade de dióxido de carbono para a fotossíntese acarretando a redução de suas taxas de crescimento (CHAVES, 2014). Barcelo e Poschenrieder (1990), reafirmam que uma das razões da redução da altura da planta, diâmetro caulinar e área foliar é a redução da taxa de fotossíntese, em função do efeito de Cd nas plantas, devido a redução da condutância estomática. Essa menor abertura estomática afeta diretamente a entrada de CO₂, que seria então assimilado através do processo fotossintético, justificando assim o menor crescimento da planta (PERFUS-BARBEOCH et al., 2002, GUIMARAES, 2008).

Figura 8: Valores médios da altura da planta (c), diâmetro caulinar (b) e número de folhas (a) em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.



3.2.2 Massa seca da raiz, massa seca do caule, massa seca das folhas, massa seca da parte aérea (MSR/MSPA) e massa seca total

Observou-se que quanto maior a dose do tratamento em que planta foi submetida, menor foi sua produção de biomassa, assim a massa seca da raiz (MSR), massa seca do caule (MSC), massa seca das folhas (MSF), massa seca parte aérea (MSPA) e massa seca total (MST)

apresentaram reduções com o aumento das doses de CdCl₂. A MSR apresentou diminuição de 3,69%, 23,24%, 27,08% e 37,34%; na MSC foi de 27,98%, 29,57%, 39,88% e 45,38%; a MSF reduziu em 39,14%, 48,34%, 51,04% e 54,23%; na MSPA o declínio foi de 30,70%, 34,11%, 42,60% e 47,50%; e para MST a redução apresentou 26,46%, 32,40%, 40,16% e 45,91%, para os tratamentos com 10, 20, 30 e 40 CdCl₂ em relação ao controle.

Tabela 9. Valores médios da Massa seca da raiz, Massa seca do caule, Massa seca das folhas, Massa seca da parte aérea e Massa seca total em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.

Doses de CdCl ₂ (mg L ⁻¹)	0	10	20	30	40
Massa seca da raiz (g)	6,24 ^a	6,01 ^{ab}	4,79 ^{abc}	4,55 ^{bc}	3,91 ^{bc}
Massa seca do caule (g)	25,30 ^a	18,22 ^b	17,82 ^b	15,21 ^b	13,82 ^b
Massa seca das folhas (g)	8,15 ^a	4,96 ^b	4,21 ^b	3,99 ^b	3,73 ^b
MSPA (g)	33,45 ^a	23,18 ^b	22,04 ^b	19,20 ^b	17,56 ^b
MST (g)	39,69 ^a	29,19 ^b	26,83 ^{bc}	23,75 ^{bc}	21,47 ^c

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O decréscimo no índice de clorofila com o aumento das doses de Cd afeta a atividade fotossintética da planta (ALI et al., 2013; HUSSAIN et al., 2013), o que segundo Mendelssohn et al. (2001) a variável é fundamental para os processos de produção de biomassa vegetal sendo considerada como um indicador sensível do estresse ocasionado por este metal, o que por consequência afeta as folhas, a qual é a estrutura responsável pela produção da maior parte dos carboidratos essenciais ao crescimento e desenvolvimento dos vegetais, sendo estes órgãos, responsáveis por 90% da massa seca acumulada nas plantas resultantes da atividade fotossintética (OLIVEIRA et al., 2007).

Chaves e Souza (2014), relatam uma redução de 74%, 62% e 56% nas biomassas secas do caule, das raízes e das folhas, respectivamente em plantas de *Jatropha curcas*. Resultados que corroboram com este trabalho foram obtidos por Cupertino (2006), trabalhando com seringueira e Marques et al. (2000), em pesquisas com 20 espécies arbóreas. Paiva et al. (2001), trabalhando com *Cedrela fissilis* Vell, na concentração de 132 µM, encontraram redução na matéria seca de raiz (MSR), matéria seca de caule (MSC) e matéria seca de folha (MSF), de 88%, 76% e 88%, respectivamente. Estes autores constataram que a produção de matéria seca de espécies arbóreas foi influenciada pela contaminação com Cd.

Chugh e Sawhney (1999) em estudos realizados com *Pisum sativum* L. evidenciaram que o Cd exerceu um efeito deletério sobre as enzimas fotossintéticas e A diminuiu progressivamente com aumento da concentração deste metal, e conseqüentemente diminuindo

a massa seca. Knecht et al. (1994); Schützendübel et al. (2001); Soltan e Rashed (2003); Vecchia et al. (2005), também relatam em estudos, que o Cd causa inibição do crescimento das raízes e da parte aérea e redução no acúmulo de matéria seca.

Figura 9: Valores médios da Massa seca da raiz (c), Massa seca do caule (b) e Massa seca das folhas (a) em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.

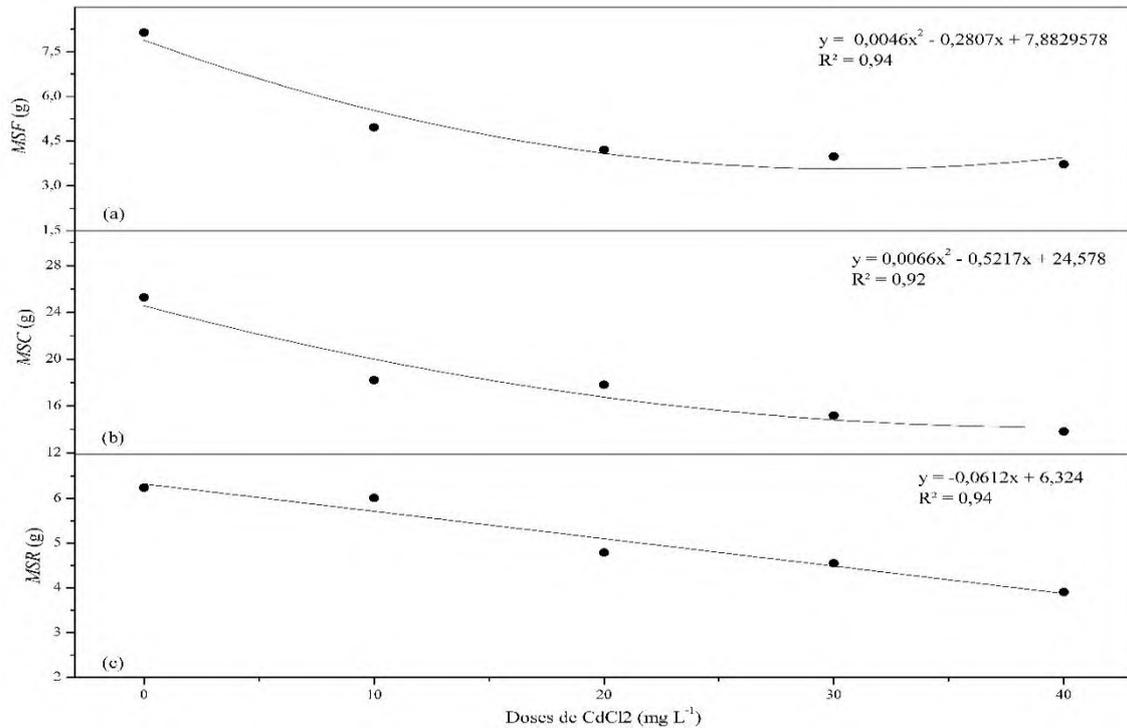
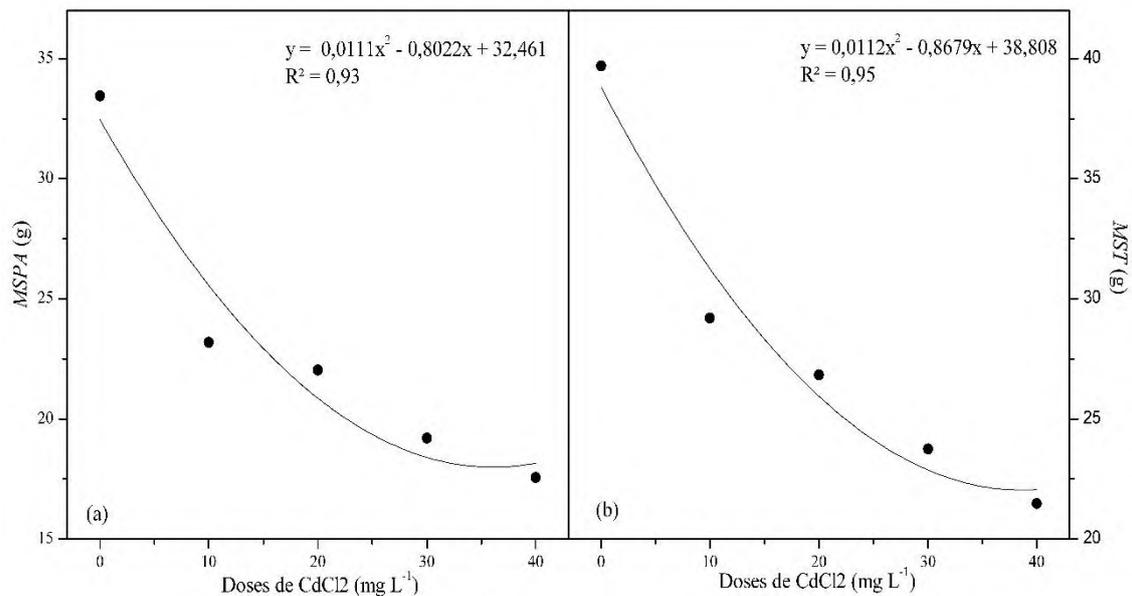


Figura 10: Valores médios da Massa seca da parte aérea (a) e Massa seca total (b) em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.



3.2.3 Relação massa seca da raiz/massa seca da parte aérea (MSR/MSPA)

A relação de massa seca da raiz e massa seca da parte aérea nas mudas de *Khaya ivorensis* verificou-se que não houve efeito significativo ($p > 0,05$) para as crescentes dosagens de cádmio. Dessa forma, não foi realizado ajustamento das equações de regressão para a variável em estudo.

3.3 Variáveis bioquímicas

3.3.1 Carboidratos solúveis totais

A concentração de carboidratos solúveis totais tanto na folha (CST_f) quanto na raiz (CST_r), demonstrou comportamento diretamente proporcional as doses de CdCl₂, ou seja, com o aumento das doses de CdCl₂ houve acréscimo da concentração carboidratos solúveis totais na planta (Tabela 10). A CST_f apresentou aumento de 101,29%; 108,39%; 136,77% e 214,19%, e para CST_r foi de 3,54%; 7,96%; 13,27% e 11,50%, para os tratamentos 10, 20, 30 e 40, respectivamente, em relação ao tratamento controle.

Tabela 10. Valores médios de Carboidratos solúveis totais na folha (CST_f) e na raiz (CST_r), em plantas de *Khaya ivorensis* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.

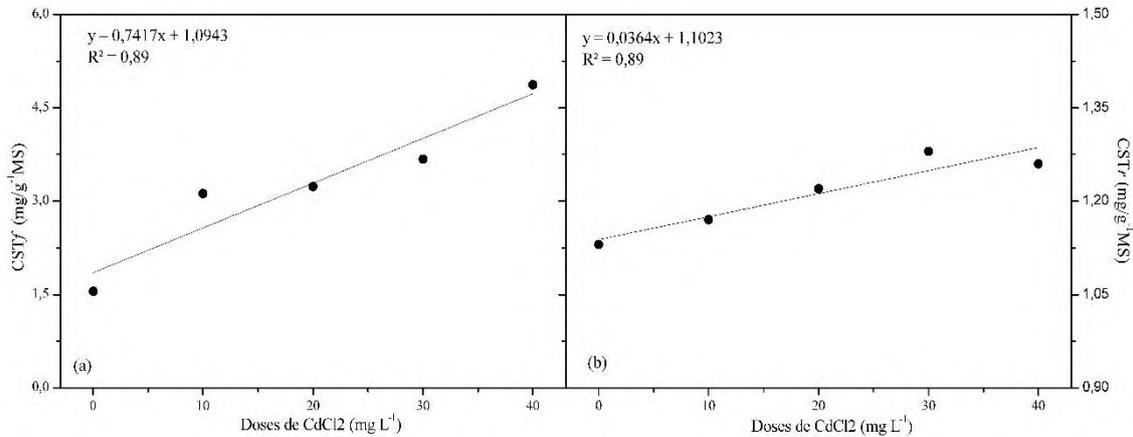
Doses de CdCl ₂ (mg L ⁻¹)	0	10	20	30	40
CST _f (mg/g ⁻¹ MS)	1,55 ^a	3,12 ^b	3,23 ^b	3,67 ^b	4,87 ^c
CST _r (mg/g ⁻¹ MS)	1,13 ^a	1,17 ^{ab}	1,22 ^{abc}	1,28 ^c	1,26 ^{bc}

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

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. Nas condições do trabalho em estudo a concentração dos carboidratos solúveis totais houve aumento na sua concentração tanto na folha quanto na raiz.

A elevação nos teores de carboidratos deve-se ao fato de o mesmo atuar como regulador osmótico, mantendo os níveis de água nas folhas, bem como o equilíbrio osmótico das células (MENDES, 2008), fato evidenciado na análise de EiUA deste estudo (Tabela 7), onde demonstrou que na dose de 40 mg L⁻¹, a eficiência foi maior.

Figura 11: Valores médios de Carboidratos solúveis totais na folha (CSTf) (a) e na raiz (CSTr) (b), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.



3.3.2 Concentração de amido na folha e na raiz.

O amido é um carboidrato de reserva energética nos tecidos vegetais, quando as plantas passam por algum tipo de estresse ele é utilizado. Por isso, ocorreram reduções nas concentrações de amido na folha (CAf) e na raiz (CAr). A diminuição na CAf foi de 3,77%; 13,21%; 16,98%; e 41,51% e para CAr foi de 3,90%; 68,83%; 68,83% e 75,32%, para os tratamentos 10, 20, 30 e 40, respectivamente, em relação ao tratamento controle.

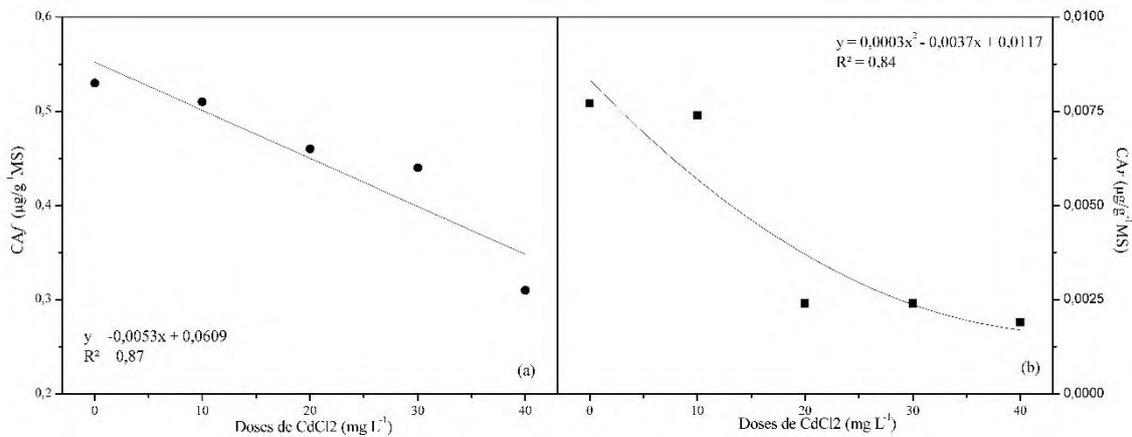
Tabela 11. Valores médios da Concentração de amido na folha (CAf), e na raiz (CAr), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.

Doses de CdCl ₂ (mg L ⁻¹)	0	10	20	30	40
CAf (μg/g ⁻¹ MS)	0,53 ^a	0,51 ^{ab}	0,46 ^{bc}	0,44 ^c	0,31 ^d
CAr (μg/g ⁻¹ MS)	0,0077 ^a	0,0074 ^a	0,0024 ^b	0,0024 ^b	0,0019 ^c

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As reduções nos teores de amido possivelmente devam estar relacionadas à diminuição do processo fotossintético e da diminuição das trocas gasosas (Tabela 5), que diminuem a entrada de CO₂ principal componente para produção de amido no ciclo C3. Segundo Nogueira (2015), outra possível resposta está no aumento da atividade das enzimas α e β amilase que atuam na degradação do amido em condições de estresse para a formação de açúcares, especialmente a sacarose, onde observou-se neste estudo que também houve aumento da concentração nas folhas.

Figura 12: Valores médios da Concentração de amido na folha (CAf) (a), e na raiz (CAr) (b), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.



3.3.3 Concentração de sacarose na folha e na raiz

No presente trabalho, o comportamento da concentração de sacarose foi distinto para folhas (CSf) e raiz (CSr). Para CSf, ocorreu aumento em função das doses, apresentando crescimento de 6,75%; 80,33%; 98,12% e 102,29%, para os tratamentos 10, 20, 30 e 40, respectivamente, em relação ao tratamento controle. Enquanto que para CSr, ocorreu decréscimo de 69,61%; 75,29%; 72,97% e 80,51%, para os tratamentos 10, 20, 30 e 40, respectivamente, em relação ao tratamento controle.

Tabela 12. Valores médios da Concentração de sacarose na folha (CSf), na raiz (CSr), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.

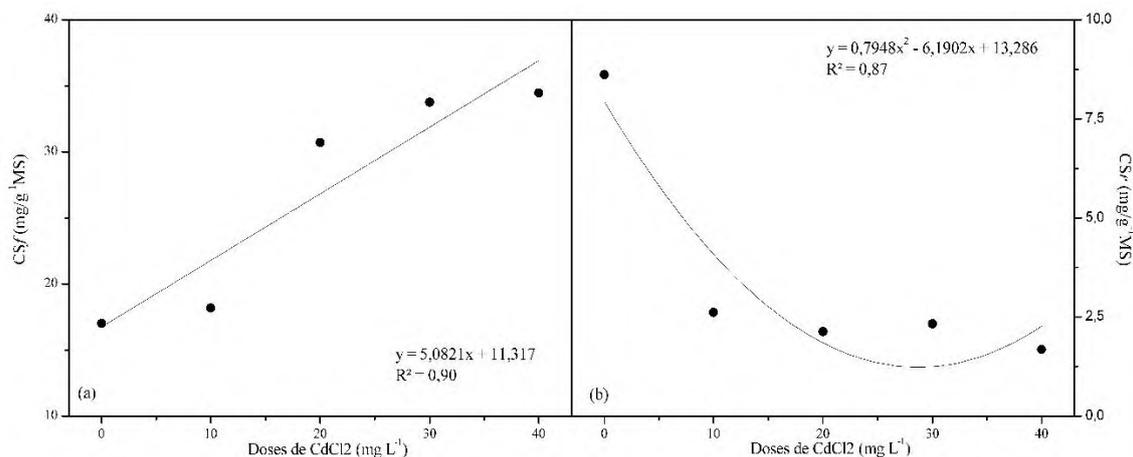
Doses de CdCl ₂ (mg L ⁻¹)	0	10	20	30	40
CSf (mg/g ⁻¹ MS)	17,03 ^a	18,18 ^a	30,71 ^b	33,74 ^b	34,45 ^b
CSr (mg/g ⁻¹ MS)	8,62 ^c	2,62 ^b	2,13 ^{ab}	2,33 ^{ab}	1,68 ^a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O aumento nos teores de sacarose nas folhas de *Kaya ivorensis* deve-se à biossíntese de sacarose, e provavelmente é promovido pela maior atividade da enzima sacarose fosfato sintase que atua na célula fotossintética localizada no citosol, com a função de proteger a integridade de membranas e proteínas em condições de estresse (HOEKSTRA et al, 2001). No entanto, Lee et al (2008) discutem que o acúmulo de carboidratos solúveis que ocorre durante o estresse dá-se mais em função da hidrólise de amido através da enzima α e β -amilase em açúcares. Esses açúcares podem ser quebrados e então transportados para os diversos drenos, na forma de sacarose.

Na maioria das plantas, a sacarose é o principal açúcar exportado dos locais de síntese (folhas) para as regiões de consumo (caule, gemas vegetativas, raízes e órgãos reprodutivos) onde será utilizada para o crescimento e/ou armazenamento. As hexoses liberadas a partir da hidrólise de sacarose podem ser utilizadas em processos anabólicos ou catabólicos e também ao fornecimento de açúcares redutores, sendo muito utilizado para o processo de ajustamento osmótico (KINGSTON-SMITH et al., 1999). Em situação de estresse, o metabolismo de carboidratos é alterado, havendo muitas vezes a conversão de outros açúcares para sacarose (LEE et al, 2008). Porém, a diminuição dos teores de sacarose nas raízes pode ser explicada pelo fato de que ao invés do composto ser exportado em maior quantidade das folhas para as raízes, o mesmo foi convertido em outros açúcares e carboidratos, fazendo com que a concentração transportada para as raízes seja menor.

Figura 13: Valores médios da Concentração de sacarose na folha (CSf) (a), na raiz (CSr) (b), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.



3.3.4 Concentração de glicina betaína e prolina na folha e na raiz.

Como consequência ao estresse, as plantas sintetizam e acumulam substâncias que ajudam na proteção e resistência dos vegetais, dentre eles estão a glicina betaína e a prolina. No presente trabalho, a concentração de glicina nas folhas (CGf) e na raiz (CGr) exibiu aumento em função das doses. Com CGf apresentando acréscimo de 85%; 92,29%; 163,09% e 195,03%, e para CGr foi de 2,83%; 53,82%; 103,27% e 148,59%, para os tratamentos 10, 20, 30 e 40, respectivamente, em relação ao tratamento controle. A concentração de prolina tanto nas folhas (CPf) quanto na raiz (CPr) exibiu aumento em função das doses. Com CPf apresentando acréscimo de 9,86%; 44,27%; 68,58% e 101,15%, e para CPr foi de 21,69%; 60,32%; 134,92% e 156,61%, para os tratamentos 10, 20, 30 e 40, respectivamente, em relação ao tratamento controle.

Tabela 13. Valores médios da Concentração de glicina e prolina na folha (CGf), e na raiz (CGr), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.

Doses de CdCl ₂ (mg L ⁻¹)	0	10	20	30	40
CGf (mg/g ⁻¹ MS)	21,13 ^a	39,09 ^b	40,63 ^b	55,59 ^c	62,34 ^c
CGr (mg/g ⁻¹ MS)	29,02 ^a	29,84 ^a	44,64 ^b	58,99 ^c	72,14 ^d
CPf (μMg ⁻¹ MS)	4,36 ^a	4,79 ^a	6,29 ^b	7,35 ^c	8,77 ^d
CPr (μMg ⁻¹ MS)	1,89 ^a	2,30 ^{ab}	3,03 ^b	4,44 ^c	4,85 ^c

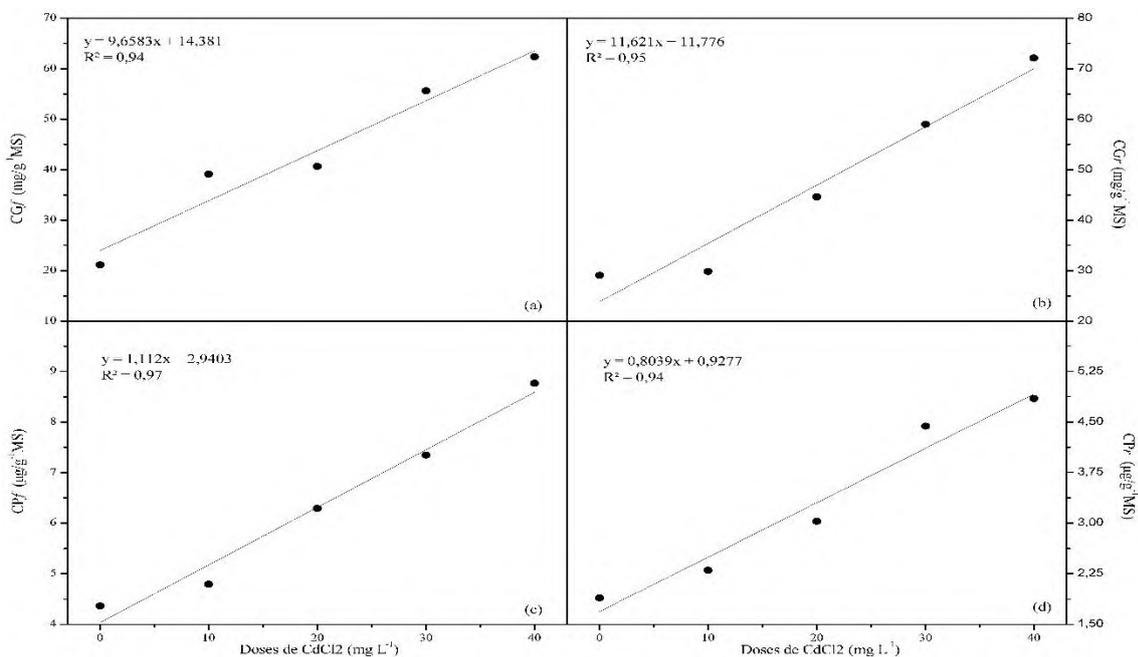
Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O grande acúmulo de glicina betaína na planta sinaliza que ela é afetada pelo cádmio. E este acúmulo ocorre para proteger o metabolismo vegetal uma vez que a glicina-betaína pode atuar como osmólito compatível e mantendo o contrapeso da água entre a célula vegetal e o ambiente, estabilizando as macromoléculas (MELONI, 2004). Para Ashraf e Foolad (2007), a principal função da glicina-betaína consiste em proteger as membranas dos tilacóides para procurar manter a eficiência fotoquímica na fotossíntese.

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 (NASCIMENTO, 2017).

A maior concentração de prolina pode ser explicada pela decorrência da biossíntese e do seu acúmulo no vacúolo ou no citosol, com função osmoprotetora preservando a integridade celular das proteínas, enzimas e membranas para a continuidade das atividades vitais e, constituintes de uma das estratégias adaptativas dos vegetais aos múltiplos efeitos causados pelo estresse (ABDUL JALEEL et al., 2007).

Figura 14: Valores médios da Concentração de glicina na folha (a) e na raiz (b) e prolina na folha (c), e na raiz (d), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.



3.3.5 Concentração de Cádmiio na planta.

Com o acréscimo de Cd na solução nutritiva, houve um aumento na concentração desse elemento na parte aérea (caule + folha) e nas raízes de *Khaya ivorensis*, porém na parte aérea das plantas submetidas a dosagem de 10 mg/ L⁻¹ a concentração foi maior que as demais dosagens, demonstrando que nesta dosagem ela consegue translocar o Cd da raiz para a parte aérea da planta com mais facilidade quando comparada com os demais tratamentos. O que segundo Guo e Marschner (2001) pode ser explicado pela redistribuição de cádmio na planta associada com fitoquelatinas (PCs). O complexo Cd-fitoquelatinas pode representar uma forma móvel para o transporte de cádmio das raízes para as partes aéreas. A fitoquelatina é uma estrutura complexa, formando peptídeos ricos em cisteína, ou seja, ricos em aminoácidos, que são doadores de elétrons. O Grupo –SH delas é capaz de formar compostos de coordenação com metais pesados, Cd e outros, com o que a toxidez dos mesmos é diminuída. Malavolta (2006) relata que o próprio Cd, curiosamente, induz à síntese das quelatinas que diminuem a sua toxidez.

Para os outros tratamentos de 20, 30 e 40 mg/L⁻¹, a concentração de Cd da parte aérea foi menor em comparação com a concentração na raiz (Tabela 14), Dixit et al. (2001) ressaltam que o baixo acúmulo de Cd nas folhas pode ser uma estratégia para proteger as funções fotossintéticas do estresse oxidativo induzido por este metal. Para explicar a maior concentração de Cd nas raízes, Oliveira et al. (2001) relatam que por este órgão da planta constituir a parte que está diretamente em contato com o cádmio, geralmente, apresentam os teores mais elevados.

Tabela 14. Valores médios da Concentração de Cadmio na folha (CCf), no caule (CCc) e na raiz (CCr), em plantas de *Khaya ivorensis* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.

Doses de CdCl ₂ (mg L ⁻¹)	0	10	20	30	40
CCf (mg L ⁻¹)	0,00757 ^a	0,04971 ^d	0,02857 ^c	0,01500 ^{ab}	0,02300 ^{bc}
CCc (mg L ⁻¹)	0,00086 ^a	0,10143 ^d	0,05143 ^b	0,04471 ^b	0,07143 ^c
CCr (mg L ⁻¹)	0,03214 ^a	0,11957 ^b	0,18900 ^c	0,23829 ^d	0,27071 ^e

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3.3.6 Fator de Bioacumulação (FB), Fator de Translocação (FT) e dose crítica de toxidez.

Espécies tolerantes nem sempre são hiperacumuladoras, sendo assim o fator de translocação demonstra a eficiência da planta em transportar um elemento da raiz para a parte aérea, enquanto que o fator de bioacumulação avalia a eficiência da planta em acumular o metal em relação à concentração do solo (SHEORAN et al., 2011).

Os resultados mostram que *Khaya ivorensis* demonstrou comportamento similar entre FT e FB nas diferentes concentrações de Cd (Figura 15). O FT foi maior apenas no tratamento com a dosagem de 10 mg/L⁻¹, para os outros tratamentos com dosagem de 20, 30 e 40 mg/L⁻¹, este fator foi baixo, ou seja, houve restrição na translocação do metal para a parte aérea da planta.

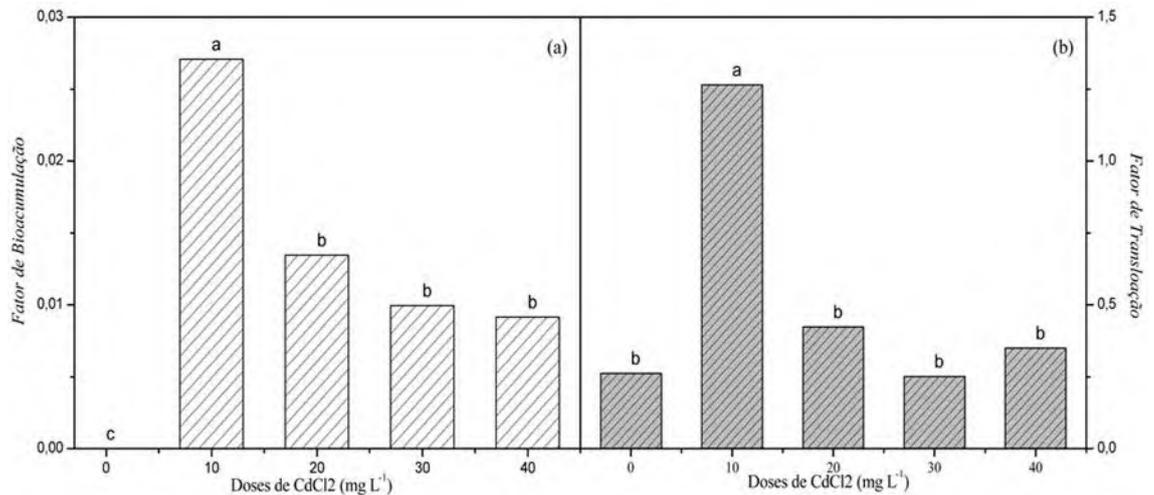
Para tentar minimizar os efeitos adversos à exposição de elementos-traço as plantas desenvolvem mecanismos de tolerância a esses elementos. Os mecanismos responsáveis pela tolerância de plantas a metais incluem a exclusão e a acumulação, na exclusão a absorção é evitada, o que previne a entrada de íons no citosol (BAKER, 1987). A imobilização de Cd na parede celular das raízes é a primeira importante barreira contra o estresse promovido pelo Cd (NISHIZONO et al., 1989) havendo restrição na translocação para a parte aérea (BAKER, 1987). A imobilização nas células das raízes, juntamente com os valores de FT baixos, associado a FB<1 podem caracterizar mecanismo de exclusão, visando minimizar a toxidez do Cd (BAKER, 1987; LEHMANN e REBELE, 2004).

ACCIOLY et al. (2004) observaram maiores teores de Cd na raiz em relação à parte aérea, sendo um indicativo da limitação da translocação desses metais para a parte aérea em mudas de *Eucalyptus camaldulensis*. Um estudo realizado por CHANDRA et al. (2010) também constataram, maiores acúmulos de Cd nas raízes de plantas de *Vigna radiata* e *Vigna unguiculata*, o que pode estar relacionado à presença de ácidos orgânicos nos exsudatos das raízes, sendo que possivelmente o metal se liga a estes ácidos limitando a translocação para a parte aérea.

Soares (2001) ao trabalhar com o acúmulo de metais em 20 mudas de árvores, relata que a espécie *D. cuneatum*, não foi influenciada pela contaminação, e apresentou elevado índice de translocação de Cd (94%), porém esses se acumularam mais no caule do que nas folhas. Isso pode indicar um mecanismo adicional de proteção ocasionando menor impacto da contaminação em relação às espécies que apresentaram maior acúmulo nas folhas. Enquanto isso, algumas espécies como *C. fissilis*, *C. langsdorffi* e *A. mangium* apresentaram baixa translocação Cd, o que pode estar contribuindo para a baixa sensibilidade dessas espécies à

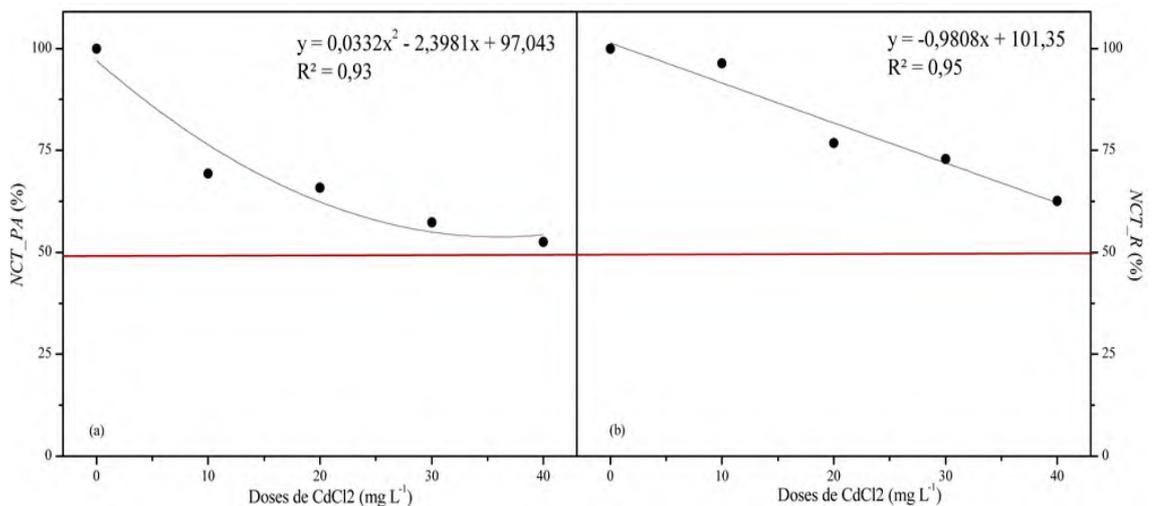
contaminação. As espécies *M. nictidans*, *M. peruiferum*, *Piptadenia gonoacantha*, *S. macranthera* e *T. micrantha* também obtiveram valores altos de translocação de Cd para a parte aérea, sendo afetadas negativamente pela contaminação.

Figura 15: Valores médios para o Fator de Bioacumulação (a) e Fator de Translocação (b), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.



A nível de toxidez mesmo nas doses mais elevadas, as plantas de *Khaya ivorenses* não apresentaram nível crítico de toxidez em nenhum dos tratamentos testados no presente trabalho (Figura 16). Apesar da redução da matéria seca tanto na parte aérea quanto na raiz, os valores médios apresentados não foram capazes de exibir tal resultado (Tabela 9). Dessa forma, o *Khaya ivorensis* demonstra sua tolerância ao elemento cádmio, evidenciando seu potencial para ser utilizada como espécie fitoextratora em áreas com elevados teores de Cd.

Figura 16: Valores médios para o nível crítico de toxidez na folha (NCT_PA) (a) e na raiz (NCT_R) (b), em plantas de *Khaya ivorenses* submetidas a diferentes doses de cloreto cádmio.



4 CONCLUSÃO

1. O crescimento e as modulações da espécie *Khaya ivorensis* foram diferentes em relação as dosagens de cádmio, houve alterações negativas no metabolismo da planta, o que é normal devido estar sob estresse, porém obteve uma resposta satisfatória, mostrando-se tolerante durante o período de exposição estudado.

2. O *Khaya ivorensis* não é uma hiperacumuladora, com tudo é uma espécie indicada para ser utilizada em programas de fitorremediação, para estabilizar áreas contaminadas com cádmio.

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 deficit. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v.59, p.150-157, nov. 2007.
- ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O.; CURI, N. et al. Amenização do calcário na toxidez de zinco e cádmio para mudas de *Eucalyptus camaldulensis* cultivadas em solo contaminado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.4, p.775-783, 2004.
- ALI, Hazrat; KHAN, Ezzat; SAJAD, Muhammad Anwar. Phytoremediation of heavy metals – concepts and applications. **Chemosphere.**, v. 91., n 7., p. 869-881, 2013.
- ANÁLISE QUÍMICA DE TECIDO VEGETAL. In: Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes / editor técnico, Fábio Cesar da Silva. – 2. ed. rev. ampl. – Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2009.
- 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.
- BAKER, A. J. M. Metal tolerance. **New Phytologist**, Cambridge, v. 106, n. 1, p. 93-111, May 1987.
- BARCELÓ, J. & POSCHENRIEDER, C. Plant water relations as affected by heavy metal stress: a review. **Journal of Plant Nutrition**, 13:1-37, 1990.
- BATES LS, WALDREN RP, TEARE ID. Rapid determination of free proline for water stress studies. **Plant and Soil**, v. 39, p. 205-207, 1973.
- BENAVIDES, M. P.; GALLEGO, S. M.; TOMARO, M. L. Cadmium toxicity. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, p. 21-34, 2005.
- BIZARRO, V.G.; MEURER, E.J.; TATSCH, F.R.P. Cadmium contents of phosphate fertilizers marketed in Brazil. **Ciência Rural**, 38(1): 247-250, 2008.
- BORIN, A. L. D, C. **Fitorremediação de cádmio e zinco por Amaranthaceae**. Tese (Doutorado em Ciências do Solo). Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2010.
- CHANDRA, R. P.; ABDUSSALAM A.K.; SALIM, N. et al. Distribution of bio-accumulated Cd and Cr in two *Vigna* species and the associated histological variations. **Journal of Stress Physiology & Biochemistry**, India, Vol. 6 No. 1, pp. 4-12 2010.
- CHAVES, L. H. G., SOUZA, R. S. Crescimento, distribuição e acumulação de cádmio em plantas de *Jatropha curcas*. **Revista de Ciências Agrárias**, 37(3), 286-291, 2014.
- CHUGH, L.K. & SAWHNEY, S.K. Photosynthetic activities of *Pisum sativum* seedlings grown in presence of cadmium. **Plant Physiology Biochemistry** 37: 297-303, 1999.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução** nº 460, de 30 de dezembro de 2013. Brasília DF, n. 249, 2013.

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

CUPERTINO, I. C. F. S. Respostas morfofisiológicas e nutricionais de plantas jovens de seringueira [*Hevea brasiliensis* (Willd. ex. ADR. de Juss.) Muell.-Arg.] cultivadas na presença de alumínio, cádmio, níquel e zinco. **Tese** (Doutorado em Agronomia), Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2006.

DAS, P; SAMANTARAY, S; ROUT, G.R. Studies on cadmium toxicity in plants: a review. **Environ. Pollut.**, 98(1): 29-36, 1997.

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.

FAN, K. C., HSI, H. C., CHEN, C. W., Lee, H. L., & Hseu, Z. Y. Cadmium accumulation and tolerance of mahogany (*Swietenia macrophylla*) seedlings for phytoextraction applications. **Journal of environmental management**, 92(10), 2818-2822, 2011.

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.

GARBISU, C.; ALKORTA, I. Phytoextraction: a cost effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. **Bioresource Technology**, Essex, v. 77, n. 3, p. 229-236, May 2001.

GOLAN-GOLDHIRSH, A. Plant tolerance to heavy metals, a risk for food toxicity or a means for food fortification with essential metals: the *Allium schoenoprasum* model. In: TWARDOWSKA, I.; ALLEN, H. E.; HÄGGBLUM, M. M.; STEFANIAK, S. **Soil and water pollution monitoring, protection and remediation**. Krakow: Poland, v. 69, p. 479-486, 2006.

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

GUIMARÃES, Marcelo de A. et al. Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. **Revista Trópica-Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 2, p. 58-68, 2008.

HODGE, J. E.; HOFREITER, B. T. Determination of reducing sugars and carbohydrates. In: WHISTLER, J. E.; WOLFROM, M. L. (Ed.). **Methods in carbohydrate chemistry**. New York: Academic Press. v. 1, p. 380-394, 1962.

HOEKSTRA, F.A.; GOLOVINA, E.A.; BUITINK, J. Mechanism of plant desiccation tolerance. *Trends in Plant Science*, Amsterdam, v. 6, n.9, p.431-438, 2001.

- IHA, D. S. Bioacumulações de Cd, Ni, Pb e Zn durante os crescimentos de *Salvinia minima* e *Lemna valdiviana*. **Tese** (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.
- KAVAMURA, V. N.; ESPOSITO, E. Biotechnological strategies applied to the decontamination of soils polluted with heavy metals. **Biotechnology Advances**, v. 28, n. 1, p. 61-69, 2010.
- KINGSTON-SMITH, A.H., WALKER, R.P. & POLLOCK, C.J. Invertase in leaves: conundrum or control point. **Journal of Experimental Botany** 50:735-743, 1999.
- KNECHT, J.A.; VAN DILLEN, M.; KOEVOETS, P.L.M.; SCHAT, H.; VERKLEIJ, J.A.C. & ERNST, W.H.O. Phytochelatins in cadmiumsensitive and cadmium-tolerant *Silene vulgaris*. **Plant Physiology** 104: 255-261, 1994.
- 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*. **Phytologist**, p.1-20, 2007.
- KURDZIEL, B.M.; PRASAD, M.N.V.; STRZALKA, K. Photosynthesis in heavy metal stressed plants. In: PRASAD, M.N.V. Heavy metal stress in plants: From biomolecules to ecosystems. 2nd ed. Springer, **printed in India**, p.146-181, 2004.
- LASAT, M. M. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 31, n. 1, p. 109- 120, Jan. 2002.
- LEE, B.R.; JIN, Y.L.; JUNG, W.J.; AVICE, J.C.; MORVAN-BERTRAND, A.; OURRY, A.; PARK, C.W.; KIM, T.H. Water-deficit accumulates sugars by starch degradation - not by de novo synthesis – in white clover leaves (*Trifolium repens*). **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.134, p.403-411, 2008.
- LEHMANN, C.; REBELE, F. Assessing the potential for cadmium phytoremediation with *Calamagrostis epigejos*: a pot experiment. **International Journal of Phytoremediation**, London, v. 6, n. 2, p. 169-183, Apr. 2004.
- LOBATO, A. K. PEREIRA, T. S. BARBOSA, M. A. C. **Protocolos do núcleo de pesquisa vegetal básica e aplicada**, 2012.
- LUX, A; MARTINKA, M; VACULÍK, M AND WHITE, P.J. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review. **J. Exp. Bot.**, 1-17, 2010.
- MACHADO, E. C., et al. Respostas da fotossíntese de três espécies de citros a fatores ambientes. **Pesquisa agropecuária brasileira**, V. 40, n. 12, p. 1161-1170, 2005.
- MARCHIOL, L.; ASSOLARI, S.; SACCO, P.; ZERBI, G. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil. **Environmental Pollution, Barking**, v. 132, n. 1, p. 21-27, Nov. 2004.
- MARQUES, T.C.L.L. de S. e M.; MOREIRA, F.M. de S.; SIQUEIRA, J.O. Crescimento e teor de metais de mudas de espécies arbóreas cultivadas em solo contaminado com metais pesados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 35:121-132, 2000.

MELONI, D.A. Braz J. Plant Physiol., 16 (1):39-46. manipulation of leaf senescence. **Plant Physiology**, v. 113, p. 313-319, 2004.

MENDELSSOHN, I.A.; MCKEE, K.L. & KONG, T. A comparison of physiological indicators of sublethal cadmium stress in wetland plants. **Environmental and Experimental Botany** 46: 263-275, 2001.

MENDES, F., S.; et al. Níveis de prolina e carboidratos solúveis totais em folhas de Mogno (*Swietenia macrophylla* King R. A) induzidas ao estresse hídrico e a reidratação. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, n. S2, p. pg. 939-941, 2008.

NASCIMENTO, S. P do. Efeito do déficit hídrico em feijão caupi para identificação de genótipos com tolerância à seca. **Dissertação**. (Mestrado em Agronomia) Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2009.

NISHIZONO, H.; KUBOTA, K.; SUZUKI, S.; ISHII, F. Accumulation of heavy metals in cell walls of *Polygonum cuspidatum* roots from metalliferous habitats. **Plant and Cell Physiology**, Kyoto, v. 30, n. 4, p. 595-598, June 1989.

OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O. T.; BESPALHOK FILHO, J. C.; RIBAS, K. C. Z.; SILVA, D. K. T. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 2, p. 71-76, 2007.

OLIVEIRA, J.A.; Cambraia, J.; Cano, M.A.O. & Jordão, C.P. Absorção e acúmulo de cádmio e seus efeitos sobre o crescimento relativo de plantas de aguapé e de salvínia. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal** 13: 329-341, 2001.

PAIVA, H. D., CARVALHO, J. D., SIQUEIRA, J. O., MIRANDA, J. R. P., & FERNADES, A. R. 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**, 26(4), 467-473, 2002.

PAIVA, H. N.; CARVALHO, J. G.; SIQUEIRA, J. O. Efeito da aplicação de cádmio sobre o teor de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.). **Ciência Florestal**, v. 11, p. 153-162, 2001.

PAQUIN, D. G.; CAMPBELL, S.; LI, Q. X. Phytoremediation in subtropical Hawaii a review of over 100 plant species. **Remediation Journal**, v. 14, n. 2, p. 127-139, 2004.

PEREIRA, A. C. C. *Parkia gigantocarpa* Ducke (FABACEAE-MIMOSOIDEAE) sob deficiência hídrica no solo: respostas fisiológicas, bioquímicas e de crescimento. 105f. **Dissertação** (Mestrado). Universidade Federal Rural Da Amazônia, 2013.

PRASAD, N.M.V. Cadmium toxicity tolerance in vascular plants. **Environmental and Experimental Botany**, v.35, p. 525-545, 1995.

ROCHA, D. G. F. e TÁVORA, F. J. F. Relações hídricas de plantas de feijão de corda submetidas a deficiência hídrica na fase vegetativa, **Enciclopédia Biosfera**. Goiânia, 2013.

- SANTOS, G. A. DOS. Crescimento e respostas antioxidantes de macrófitas aquáticas submetidas ao arsênio. **Dissertação** (Mestrado em Fisiologia Vegetal), Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2006.
- SARRUGE, J.R. Soluções nutritivas. *Summa Phytopathologica*, **Botucatu**, v. 1, n.3, p.231-33, 1975.
- SCHÜTZENDÜBEL, A.; POLLE, A. Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, p. 1351-1365, 2002.
- SCHÜTZENDÜBEL, A.; SCHWANZ, P.; TEICHMANN, T.; GROSS, K.; LANGENFELD-HEYSER, R.; GODBOLD, D. L.; POLLE, A. Cadmium-induced changes in antioxidative systems, hydrogen peroxide content, and differentiation in scots pine roots. **Plant Physiology**, v. 127, p. 887-898, 2001.
- SHAH, F.R., N. AHMAD, K.R. MASOOD AND D.M. Zahid. The influence of Cd and Cr on the biomass production of Shisham (*Dalbergia sissoo* Roxb.) seedlings. **Pak. J. Bot.**, 40(4): 1341-1348, 2008.
- SHEORAN, V.; SHEORAN, A. S.; POONIA, P.. Role of Hyperaccumulators in Phytoextraction of Metals From Contaminated Mining Sites: A Review. **Environmental Science And Technolo**, India, v. 1, n. 41, p.168-214, 2011.
- SIMS, D. A.; GAMON, J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. **Remote Sensing of Environment**, v.81, p.337– 354, 2002.
- SMEETS, K; CUYPERS, A; LAMBRECHTS, A; SEMANE, B; HOET, P; LAERVE, AV; VANGRONSVELD, J. Induction of oxidative stress and antioxidative mechanisms in *Phaseolus Vulgaris* after Cd application. **J. Plant Physiol. Biochem.**, 43: 437-444, 2005.
- SOARES, C. R. F. S., et al. Acúmulo e distribuição de metais pesados nas raízes, caule e folhas de mudas de árvores em solo contaminado por rejeitos de indústria de zinco. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, 13.3: 302-315, 2001.
- SOLTAN, M.E. & RASHED, M.N. Laboratory study on the survival of water hyacinth under several conditions of heavy metal concentrations. **Advances in Environmental Research 7**: 321-334,2003.
- SOUZA, V.L.; SILVA, D.C.; SANTANA, K.B.; MIELKE, M.S.; ALMEIDA, A.F.; MANGABEIRA, P.A.O.; ROCHA, E.R. Efeitos do cádmio na anatomia e na fotossíntese de duas macrófitas aquáticas. **Acta Botanica Brasilica**, v.23, p. 343- 354, 2009.
- VAN HANDEL, E. Direct microdetermination of sucrose. **Analytical Biochemistry**, v. 22: p. 280-283, 1968.
- VASSILEV, A.; VANGRONSVELD, J.; YORDANOV, I. Cadmium phytoextraction: present state, biological backgrounds and research needs. Reviews. **Bulgarian Journal of Plant Physiology**, Sofia, v. 28, n. 3/4, p. 68-95, 2002.
- VECCHIA, F.D.; LA ROCCA, N.; MORO, I.; DE FAVERI, S.; ANDREOLI, C. & RASCIO, N. Morphogenetic ultrastructural and physiological damages suffered by submerged leaves of *Elodea canadensis* exposed to cadmium. **Plant Science 168**: 329-338, 2005.

WANG, H. B.; WONG, M. H.; LAN, C. Y.; BAKER, A. J. M.; QIN, Y. R.; SHU, W. S.; CHEN, G. Z.; YE, Z. H. Uptake and accumulation of arsenic by 11 *Pteris* taxa from southern China. **Environmental Pollution, Barking**, v. 145, n. 1, p. 225-233, Jan. 2009.

WHO. J. **Health risks of heavy metals from long-range transboundary air pollution**. p. 144, 2007.

WU, S.; ZU, Y.; WU, M. Cadmium response of the hairy root culture of the endangered species *Adenophora lobophylla*. **Plant Science**, v. 160, p. 551-562, 2001.

XIAO, X. et al. Potential of *Pteris vittata* L. for phytoremediation of sites co-contaminated with cadmium and arsenic: the tolerance and accumulation. **Journal of Environmental Sciences**, v. 20, n. 01, p. 62-67, 2008.

YANG, X. E., LONG, X. X.; NI, W.; FU, C. *Sedum alfredii* H: A new Zn hyperaccumulating plant first found in china. **Chinese Science Bulletin**, Beijing, v. 47, n. 19, p. 1634-1637, Oct. 2002.

ZHAO, B.; KONDO, M.; MAEDA, M.; OZAKI, Y.; ZHANG, J. Water-use efficiency and carbon isotope discrimination in two cultivars of upland rice during different developmental stages under three water regimes. **Plant and Soil**. The Hague, v. 261, p. 61-75, 2004.