



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

GLAUCO ANDRÉ DOS SANTOS NOGUEIRA

**Trocas Gasosas, Crescimento e Comportamento Bioquímico em Plantas
Jovens de Paricá (*Schizolobium Amazonicum* Huber ex Ducke) em
Diferentes Concentrações de Cádmio**

**BELÉM
2018**

GLAUCO ANDRÉ DOS SANTOS NOGUEIRA

Trocas Gasosas, Crescimento e Comportamento Bioquímico em Plantas Jovens de Paricá (*Schizolobium Amazonicum* Huber ex Ducke) em Diferentes Concentrações de Cádmio

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, para o cumprimento do processo de defesa como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para obtenção do título de Doutor.

Área de concentração: Ecofisiologia de espécies arbórea e ecologia.

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

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

**BELÉM
2018**

FICHA CATALOGRÁFICA

Nome: Glauco André dos Santos Nogueira

Título: Trocas Gasosas, Crescimento e Comportamento Bioquímico em Plantas Jovens de Paricá (*Schizolobium Amazonicum* Huber ex Ducke) em Diferentes Concentrações de Cádmiio.

Natureza do trabalho: Tese

Programa de pós graduação: Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais

Orientador: Cândido Ferreira de Oliveira Neto

Ano: 2018

Nº de folhas:

Palavras Chaves:

GLAUCO ANDRÉ DOS SANTOS NOGUEIRA

Trocas Gasosas, Crescimento e Comportamento Bioquímico em Plantas Jovens
de Paricá (*Schizolobium Amazonicum* Huber ex Ducke) em Diferentes
Concentrações de Cádmi

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Ciências Florestais, para obtenção do título de Doutor. Área de concentração Ecofisiologia de espécies arbórea e ecologia.

Data de aprovação

Banca Examinadora

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

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

Dr.ª Hellen Siglia Demétrio Barros – 2º Examinadora
Sem Vínculo Institucional

Dr.ª Joze Melisa Nunes de Freitas – 3º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA - Capitão Poço

Dr.ª Luma Castro de Souza– 4º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA - Capitão Poço

Dr.º Heráclito Eugênio Oliveira da Conceição – 5º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA - Capitão Poço

Ofereço

A Deus, por tudo que tem feito em minha vida até hoje.

Dedico

Aos meus exemplos de vida Selma Nogueira (mãe), Gerson Nogueira (pai)

e as razões do meu viver: a minha amada esposa Wanessa Nogueira, aos meus filhos Joshua e Gael Nogueira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força em todos os momentos difíceis, pela proteção, sabedoria e por permitir com que eu chegasse neste momento tão almejado da minha vida.

À minha amada mãe e amado pai, por todas as horas que se dedicaram com seus joelhos dobrados pedindo para que nosso Deus me ajudasse, meu muito obrigado. Amo muito vocês.

À minha esposa Wanessa Nogueira e meus filhos Joshua e Gael Nogueira que são as razões da minha vida, tudo que fiz, tudo que faço e tudo que eu fizer vai ser pensando em vocês. Amor incondicional.

Ao meu amor e minha vida Wanessa Nogueira por tudo que tem feito por mim até hoje. Te amo mais que a mim mesmo.

Aos meus sogros Nazila Menezes e Jorge Paulo por dedicar boa parte de seu tempo em cuidar dos meus filhos para que eu estudasse. Meu muito obrigado. Amo vocês.

Ao meu orientador, professor e amigo Dr. Cândido Ferreira de Oliveira Neto pela oportunidade, acolhimento, incentivo, atenção, por todos os conselhos prestados seja para vida seja para a minha caminhada científica. Receba minha gratidão e meu muito obrigado.

Ao curso de pós-graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia, pela oportunidade de ingressar no curso de doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudo durante o curso de doutorado.

Aos meus parceiros e amigos Ana Ecídia e Vitor Resende, que não mediram esforços para me ajudar nessa caminhada, seja no viveiro e laboratório. Esse agradecimento é pouco por tudo que vocês fizeram, meu muito, muito obrigado.

Aos amigos e amigas do grupo de estudos da biodiversidade em plantas superiores: Luciana Sousa, Diana Julia, Jéssica Suellen, Juscelino Palheta, Gerson Albuquerque por toda força e incentivo para formação desse trabalho.

A minha tia Cristiane Nogueira, a minha querida avó Therezinha Nogueira, a minha tia Mara Monteiro e Ducarmo Monteiro por todas as orações ligadas ao céu em oferecimento a minha vida em prol desse trabalho. Muito obrigado.

E a todos que, direto ou indiretamente, contribuíram para a realização desta tese, muito obrigado.

RESUMO GERAL

O objetivo deste trabalho foi avaliar os parâmetros fisiológicos, de crescimento e bioquímicos de plantas jovens da espécie (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) quando submetidas em diferentes concentrações de cádmio. O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação do Instituto de Ciências Agrárias (ICA), pertencente a Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), localizado em Belém-Pará, no período de dezembro de 2017 a junho de 2018. Inicialmente foram produzidas mudas a partir de sementes de paricá oriundas da Associação das Indústrias Exportadoras de Madeira do Estado do Pará em Benevides-Pará. As sementes foram semeadas em vaso tipo Leonard com capacidade de 4,6 L adaptados com garrafas pet contendo areia lavada e esterilizada (120 °C por 40 min.) Decorridos 15 dias após o semeio as mesmas receberam solução nutritiva de Sarruge. Transcorridos 60 dias após o semeio foi iniciada a aplicação das concentrações de cádmio na forma de cloreto de cádmio hidratado ($\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), com 5 tratamentos sendo constituídos de plantas controle (sem cádmio) e com doses de Cádmio (CdCl_2 178 μM , CdCl_2 356 μM , CdCl_2 534 μM , CdCl_2 712 μM) Os dados foram submetidos análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$) e as diferenças entre os tratamentos analisadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e foram ajustadas por equações de regressão polinomial $P < 0,01$ ou $0,05$ usando-se o programa Sisvar. As principais variáveis fisiológicas (fotossíntese, condutância estomática e transpiração) desestabilizaram-se em suas funções com o aumento das doses de cádmio, influenciando no processo energético das mesmas. Para as variáveis de crescimento (altura, diâmetro, número de folhas e folíolos), o cádmio proporcionou uma diminuição à medida que as doses eram aumentadas, interferindo em menor produção de biomassa foliar. As alterações dos parâmetros fisiológicos, conseqüentemente levaram a mudanças no metabolismo do carbono e nitrogênio dessas plantas, evidenciando baixas concentrações das variáveis que contem nitrogênio em suas estruturas como aminoácidos, prolina, glicina. O cádmio acumulou-se principalmente nas raízes, mas porém houve translocação para parte aérea. Diante disso, pode-se caracteriza-lá como fitoextratora.

Palavras chaves: Compostos Carbonados. Elemento Traço. Variáveis Biofísicas

GENERAL ABSTRACT

The aim of this work was to evaluate the physiological, growing and biochemical parameters of young plants of (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) when submitted in different dosages of cadmium. The experiment was developed in greenhouse of Instituto de Ciências Agrárias (ICA), belonging to Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), located in Belém-Pará, in a period of December 2017 to June 2018. Initially seedlings were produced from paricá seeds from Associação das Indústrias Exportadoras de Madeira do Estado do Pará in Benevides-Pará. The seeds were sown in a Leonard type pot with a capacity of 4.6 L adapted with pet bottles containing washed and sterilized sand. After 15 days after sowing, they received nutritive solution of Sarruge (1/4 and 1/2 strength). After 60 days after sowing the application of increasing concentrations of cadmium in the form of cadmium chloride ($\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Was used a randomized experimental design (RED), with 5 treatments being constituted of control plants (without cadmium dosages) and with cadmium dosages (CdCl_2 178 μM , CdCl_2 356 μM , CdCl_2 534 μM , CdCl_2 712 μM) with 7 repetitions each (one plant per pot) totaling 35 experimental units. The obtained data were submitted to variance analysis by F test ($p < 0,05$) and the means were compared by the least significant difference of the Tukey's test ($p < 0,05$) and were adjusted by polynomial regression equations $P < 0.01$ or 0.05 using the Sisvar program. The main physiological variables (photosynthesis, stomatal conductance and transpiration) destabilized in their functions with the increase of the cadmium doses, influencing in the energy process of the same ones. The growth, diameter, leaf number and leaflet variables, cadmium provided a reduction as the doses were increased, interfering in the production of foliar biomass. Changes in physiological effects have consequently led to changes in plant metabolism and nitrogen, evidencing the low concentrations of nitrogen-containing molecules in their structures such as amino acids, proline, and glycine. The cadmium accumulated in the roots, but there was a translocation for the aerial part. Given this, it can be considered as a phytoextractor.

Keyword: Physiological. Trace element. Carbonate compounds.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Ciclo Biogeoquímico de elementos vestigiais, destacando o Cd. As setas amarelas representam a disponibilização, as setas vermelhas a entrada na cadeia alimentar. A – Exploração antrópica; B – uso de fertilizantes.....13
- Figura 2** – Imagem das plantas jovens de (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) utilizadas no experimento.....17
- Figura 3** - Escarificação e embebição das sementes de paricá.....48
- Figura 4** - vasos adaptados tipo leonard usados no experimento.....48
- Figura 5** – Sinais de toxidez por cádmio nas mudas de paricá.....49

LISTA DE TABELAS

Tabela- 1 - Médias, equações de regressão e percentual de redução e aumento (PRA) dos parâmetros relacionados a ecofisiologia e de crescimento na parte aérea e radicular das mudas de (<i>Schizolobium amazonicum</i> Huber ex Ducke) submetidas à doses crescentes de cádmio.....	38
Tabela- 2 - Composição da solução nutritiva utilizada no experimento	49
Tabela-3 - Médias, equações de regressão e percentual de redução e aumento (PRA) dos parâmetros relacionados ao metabolismo do carbono (C) e nitrogênio (N) na parte aérea e radicular das mudas de (<i>Schizolobium amazonicum</i> Huber ex Ducke) submetidas à doses crescentes de cádmio.....	58
Tabela-4 - Valores médios das concentrações de cádmio nos três órgãos das plantas de (<i>Schizolobium amazonicum</i> Huber ex Ducke).....	60

LISTA DE SIGLAS

- (A) - Fotossíntese Líquida
- (*gs*) - Condutância Estomática
- (*E*) - Transpiração
- (*C_i/C_a*) - Relação do Carbono Intracelular e do Ambiente
- (*E_iC*) - Eficiência Instantânea de Carboxilação
- (*EUA*) - Eficiência do Uso da Água
- (*E_iUA*) - Eficiência Intrínseca do Uso da Água
- IRGA - Infra-red Gas Analyser
- (*DAP*) - Diâmetro Altura do Peito
- (*RN*) – Redutase do Nitrato
- (*RNi*) - Redutase do Nitrito
- (*GS*) - Glutamina Sintetase
- (*NAD(P)H*) - Nicotinamida Adenina Dinucleotídeo Fosfato Oxidase
- (*PRODH*) - Prolina Desidrogenase
- (*P5SDH*) - P5C Desidrogenase
- (*P5CDH*) - Pirrolina-5-Carboxilato Desidrogenase
- (*PRA*) - Percentual Relativo de Redução e Aumento

SUMÁRIO

1 - ASPECTOS GERAIS DA PESQUISA.....	12
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.1.1 Poluição por metais pesados	12
1.1.2 Cádmio.....	13
1.1.3 Cádmio nas plantas	14
1.1.4 (<i>Schizolobium amazonicum</i> Huber ex Ducke)	16
REFERÊNCIAS.....	20
2 - HIPÓTESES E OBJETIVOS DA PESQUISA	26
2.1 - HIPÓTESES	26
2.2 - OBJETIVOS	26
2.2.1 - Objetivo geral.....	26
2.2.2 - Objetivos específicos.....	26
3 - RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E DE CRESCIMENTO DE MUDAS DE (<i>Schizolobium amazonicum</i> Huber ex Ducke) SUBMETIDAS A DOSES DE CÁDMIO	27
RESUMO	27
ABSTRACT.....	28
3.1- INTRODUÇÃO	29
3.2- MATERIAL E MÉTODOS	29
3.2.1- Condição experimental e material vegetal.....	29
3.2.2- Produção de mudas e exposição das plantas às dosagens de cádmio	30
3.2.3- Variáveis Ecofisiológicas	30
3.2.4- Determinação dos Teores de Clorofila <i>a</i> , <i>b</i> , total (<i>a+b</i>) e antocianina	31
3.2.5- Variáveis de Crescimento.....	31
3.2.6- Delineamento experimental e análise estatística	31
3.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
3.3.1- Fotossíntese.....	32
3.3.2- Condutância estomática (<i>gs</i>)	32
3.3.3- Transpiração (<i>E</i>)	33
3.3.4- Eficiência do uso da água (EUA)	33
3.3.5- Eficiência instantânea de carboxilação (EiC).....	33
3.3.6- Eficiência intrínseca do uso de água (EiUA)	34
3.3.7- Concentração interna e do ambiente de CO ₂ (Ci/Ca).....	34

3.3.8- Clorofila <i>a</i> e <i>b</i> e total.....	35
3.3.9- Antocianina.....	36
3.3.10- Altura	36
3.3.11- Diâmetro do colo	36
3.3.12- Número de folhas e folíolos	37
3.4 - CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS.....	40
4 - AVALIAÇÃO DO METABOLISMO NITROGENADO E CARBONO EM PLANTAS JOVENS DE PARICÁ (<i>Schizolobium amazonicum</i> Huber ex Ducke). SUBMETIDAS A CONCENTRAÇÕES DE CÁDMIO	44
RESUMO	44
ABSTRACT.....	45
4.1- INTRODUÇÃO	46
4.2- MATERIAL E MÉTODOS	47
4.2.1- Condição experimental.....	47
4.2.2- Produção de mudas e exposição das plantas às dosagens de cádmio	47
4.2.3- Coleta e armazenamento do material	49
4.2.4- Variáveis bioquímicas analisadas	50
4.2.5- Delineamento experimental e análise estatística	50
4.3- RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.3.1- Sacarose	50
4.3.2- Carboidratos Solúveis Totais	51
4.3.3- Açúcares redutores	52
4.3.4- Nitrato (NO ₃ ⁻)	52
4.3.5- Enzima redutase do nitrato.....	53
4.3.6- Concentrações de Amônio Livre.....	54
4.3.7- Aminoácidos solúveis totais	54
4.3.8- Proteínas solúveis Totais	55
4.3.9- Prolina.....	56
4.3.10- Glicina-betaína	56
4.4- CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIAS.....	62

1 - ASPECTOS GERAIS DA PESQUISA

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1.1 - Poluição por metais pesados

A poluição por metais pesados tem se tornado um problema ambiental muito grave (ALI et al., 2013). Estudos apontam dois tipos de poluição por metais pesados: a poluição natural que ocorre através do intemperismo das rochas, da lixiviação de solos e atividade vulcânica gerando seu aparecimento na água e no solo (ALLEONI et al., 2005; GUILHERME et al., 2005). A origem antrópica é considerada a mais preocupante, esse tipo vem aumentando progressivamente os teores de alguns metais pesados no ambiente como alumínio (Al), arsênio (As), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), chumbo (Pb) ou cromo (Cr), principalmente em resposta às atividades industriais, agrícolas e urbanas (VARENNES, 2003 ; ALI et al., 2013). Essa antropização tem aumentado a ocorrência de áreas degradadas por tais elementos químicos, tornando-se cada vez mais acentuado (ALVES et al., 2008).

O excesso dos metais pesados pode alterar as propriedades físico-químicas dos solos, diminuir atividades microbianas, ocasionar perdas de rendimento agrícola e redução da fertilidade dos solos (GAO et al., 2010). Em concentrações elevadas são considerados como poluentes, devido à sua ocorrência generalizada e seus efeitos fitotóxicos agudos e crônicos (YADAV, 2010).

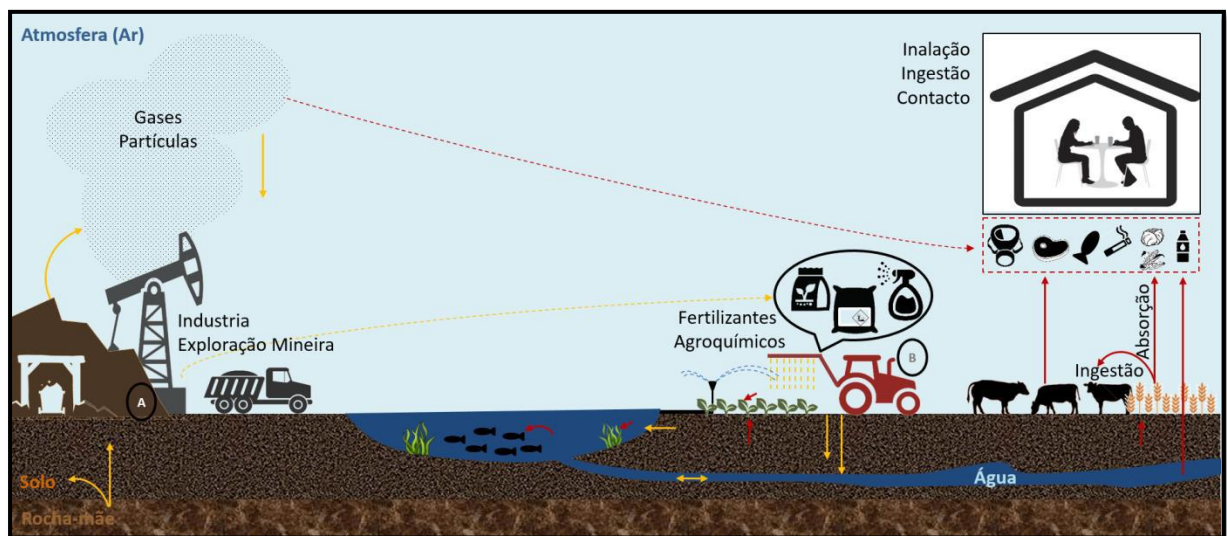
Vários fatores contribuem para tal degradação do solo por metais pesados. O pH é um fator determinante pois, quanto maior a acidez maior a disponibilidade desses elementos (CETESB, 2012). Assim como, a concentração de materiais argilosos, compostos de Ferro (Fe), Alumínio (Al), Magnésio (Mg), Zinco (Zn) ou Mangânes (Mn); a capacidade de troca iônica; o teor de matéria orgânica; a presença de outros elementos; o potencial redox e a metilação por microrganismos (PRASAD, 2004; VARENNES, 2003). Além das características do solo, deve-se também ter em conta as características de cada metal e da planta.

Isso tem despertado preocupação e interesse crescente da sociedade científica e órgãos governamentais em decorrência dos danos causados aos ecossistemas por esses elementos, em virtude de estarem diminuindo a qualidade ambiental e a vitalidade dos seres vivos, além da alta persistência no ambiente (MATEOS-NARANJO et al., 2013; KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001).

Esses elementos que trazem preocupação apresentam algumas características como: sem funções biológicas, possuem massa atômica superior a 55, número atômico superior a 23 e densidade superior 5 g cm^{-3} (VARENNE, 2003; DALCORSO et al., 2013). Esses elementos expressam seu potencial poluente diretamente nos organismos do solo, às plantas em níveis fitotóxicos, além da possibilidade de transferência para a cadeia alimentar, por meio das próprias plantas, ou pela contaminação das águas de superfície e subsuperfície (SOARES et al. 2005). A toxicidade do metal pesado varia com a espécie de planta, do metal específico, concentração da forma química, pH e composição do solo (NAGAJYOTI et al., 2010).

Os principais e mais importantes metais poluentes ambientais segundo Chang et al. (1994) e Guilherme (1999) são: Arsenio (As), Cádmio (Cd), Crômio (Cr), Mercúrio (Hg), Níquel (Ni) e Chumbo (Pb) sendo os elementos Cd, Hg e Pb, os mais perigosos, devido à toxicidade e ao seu potencial de acumulação no solo. Alguns desses elementos químicos citados acima, participam da contaminação de solos agrícolas e águas tornando-se uma preocupação ambiental, econômica e social devido aos efeitos adversos conforme (Figura 1).

Figura 1 - Ciclo Biogeoquímico de elementos vestigiais, destacando o Cd. As setas amarelas representam a disponibilização, as setas vermelhas a entrada na cadeia alimentar. A – Exploração antrópica; B – uso de fertilizantes.



Fonte: Pinto, 2017

1.1.2 Cádmio

O cádmio (Cd), que tem densidade de $8,6 \text{ g cm}^{-3}$, número atômico 48 e massa atômica 112,411g, é um dos metais pesados mais nocivos à saúde em virtude de sua alta toxicidade,

mesmo em doses relativamente baixas (USEPA, 2011). Sendo um dos metais mais estudados nos últimos anos. É um elemento considerado relativamente raro, não encontrado em estado puro na natureza (MALAVOLTA, 1994; SOUZA et al., 2009). Naturalmente ocorre ligado a outros elementos no solo sob a forma de Cd^{2+} , sulfato de cádmio (CdSO_4) e cloreto de cádmio (CdCl_2), sendo os mais frequentes (CHOPPALA et al., 2014). E na água nas formas Cd^{2+} , carbonato de cádmio (CdCO_3), hidróxido de cádmio ($\text{Cd}(\text{OH})_2$) e Sulfeto de Cádmio (CdS) (PRASAD, 2004; SMOLDERS; MERTENS, 2013).

O cádmio é produzido artificialmente principalmente pelo subproduto da mineração e refino de Zn. Geralmente, 3 kg de cádmio para cada 1.000 kg de zinco são produzidos. Também pode ser recuperado através da reciclagem de materiais como baterias de Zn-Cd, de Ni-Cd e Ag-Cd (CHOPPALA et al., 2014). Altas quantidades do elemento também são utilizadas na síntese de pigmentos (amarelo), em revestimentos e como estabilizadores para plásticos (KABATA; PENDIAS, 2011).

Este elemento pertence ao grupo dos metais de coloração cinza prateada metálica e está disponível em diversas formas incluindo folha, grânulo, pellet, pó, bastão, fio, dentre outras. É um metal macio, altamente tóxico, que pode ser facilmente cortado com uma faca, sendo em sua maior parte produzido como subproduto da extração de cobre (Cu) e chumbo (Pb) (BRADY; HUMISTON, 1986).

A sua toxicidade se dá pela eficiente absorção pelas plantas e desta forma penetra na cadeia trófica e causa envenenamento, danos aos ossos, rins, afeta o sistema nervoso, pulmões, sistema reprodutor, dentre outros órgãos (WHO et al., 2012). Diante disso, se faz necessário o uso de técnicas para a retirada deste metal do ambiente, evitando que chegue até a cadeia trófica, tendo como necessidade também, conhecer como esse elemento tóxico se comporta dentro das plantas.

Os países que se destacam entre os maiores consumidores deste metal (cerca de 80% da utilização mundial) estão os países industrializados, como os Estados Unidos, o Japão, a Bélgica, a Alemanha, a Grã-Bretanha e a França (TENÓRIO; ESPINOSA, 2011). Segundo a lista de prioridades de substâncias perigosas, anunciadas pela Agência de Substâncias Tóxicas e Registro de Doenças, o cádmio é um dos 10 principais metais mais tóxicos (ATSDR, 2007).

1.1.3 Cádmio nas plantas

No Brasil, mais especificamente algumas regiões agrícolas a contaminação dos solos por cádmio tornou-se uma séria ameaça para a produtividade das plantas cultivadas. E essa

contaminação ocorre através de fungicidas, corretivos e principalmente em fertilizantes fosfatados como superfosfatos, os amoníofosfatos, os fosfatos parcialmente acidulados e os fosfatos naturais (PROCHNOW et al., 2001). A matéria-prima para a obtenção desses produtos são as rochas fosfatadas, que apresentam em sua composição, além do fósforo, diversos contaminantes, dentre eles o cádmio (Cd), em variadas concentrações (LAEGREID et al, 1999; GABE; RODELLA, 1999; McLAUGHLIN; SINGH, 1999; PROCHNOW et al., 2001). O problema está nas sucessivas aplicações desses compostos que incrementam as quantidades de cádmio em solos e plantas.

A raízes são os primeiros órgãos vegetal a entrar em contato com o contaminante, portanto, os efeitos nocivos são observados primeiramente nela. Como consequência, a diminuição de massa seca bem como comprimento de suas raízes, são os primeiros indícios morfológicos da toxicidade do cádmio (MONTEIRO et al., 2011).

Uma vez absorvido pode causar dependendo da quantidade, redução da atividade fotossintética levando à diminuição da concentração de clorofilas e carotenóides (BURZYNSKI; KLOBUS, 2004; DIAS et al., 2013), em decorrência de sua alta mobilidade (TANG et al., 2015). Provoca distúrbios metabólicos do sistema fonte e dreno (ROY et al., 2016), além de interferir na absorção, transporte e utilização de vários elementos minerais (Ca, Mg, P e K) e água pelas plantas (DIAS et al., 2013). Causa redução no processo de absorção de nitrato e seu transporte das raízes para a parte aérea por inibição da atividade da redutase do nitrato na parte aérea (HERNANDEZ et al., 1996). Desequilibra a função homeostática e o desenvolvimento de plantas (TANG et al., 2015).

O cádmio diminui o controle do estado redox da célula, induzindo estresse oxidativo e rompimento da composição e função e propriedades de membranas que consequentemente levam à diminuição da condutância estomática, da taxa de transpiração, dos teores relativos de água nas folhas e da elasticidade da parede celular (MARTINS et al., 2013; CHOPPALA et al., 2014; GRATÃO et al., 2009 ; GALLEGO et al., 2012).

A sua toxicidade ocasiona o bloqueio de grupos essenciais de biomoléculas, a degradação de lipídios, a inibição da atividade enzimática como a de enzimas responsáveis pela fixação de CO₂, reduzindo a assimilação de carbono e o fechamento dos estômatos (SANDÁLIO et al., 2001; DALCORSO et al., 2010; MOHAMED et al., 2012; CHOPPALA et al., 2014).

O cádmio, assim como outros elementos são absorvidos pela via simplástica ou apoplástica e são transportados radialmente através do córtex da raiz até o xilema, onde seguem para a parte aérea. O cádmio pode chegar ao xilema pela via simplástica através do citoplasma de células individuais do córtex, ligadas por plasmodesmata (LUX et al., 2011). A maioria dos

íons cádmio absorvido pelas plantas permanece nas raízes e somente uma pequena parte desses íons é transportada para a parte aérea. Em geral, a distribuição de cádmio nos diferentes órgãos das plantas diminui na seguinte ordem: raiz > folhas > frutos > sementes (HASAN et al., 2009).

Contudo, algumas espécies de plantas apresentam mecanismos de tolerância, adotando estratégias de exclusão para evitar a absorção excessiva e transportes de íons metálicos, e acumulam geralmente baixas concentrações de metais em suas raízes, mesmo quando cultivadas em solos altamente contaminados (MALIK; BISWAS, 2012). Em contraste, as plantas acumuladoras podem acumular grandes quantidades de metais pesados em seus tecidos, mesmo na parte aéreas (ALI et al., 2013).

Ali et al., (2013) afirmam que as membranas plasmáticas desempenham uma importante função na homeostase dos metais, prevenindo ou reduzindo a entrada na célula. Os peptídeos metalotioninas e as fitoquelatinas podem ter um papel fundamental na homeostase, possivelmente relacionado com o transporte do metal dentro da célula vegetal. As fitoquelatinas são rapidamente induzidas, sequestrando e inativando os íons metálicos que entram no citoplasma antes que essas possam inativar enzimas de vias metabólicas essenciais.

A quelação dos metais pode influenciar positivamente no bombeamento de certas substâncias como ácidos carboxílicos e aminoácidos, possuindo potencial de formar ligações com os metais pesados e assim exercendo função de tolerância e desintoxicação; o vacúolo e o fluxo de íons para a membrana plasmática são canais para diminuir os metais pesados no citoplasma, processo para tolerância aos metais; Esses peptídeos são sintetizados enzimaticamente em resposta a vários metais (ALI et al., 2013; COUTINHO; BARBOSA, 2007; HALL, 2002; WANG et al., 2016).

1.1.4 (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke)

Nativo da Amazônia, a espécie (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke), conhecida como paricá, pertencente à família Leguminosae-Caesalpinaceae (ROSA et al., 2011), vem sendo apresentado como uma alternativa promissora do ponto vista comercial em determinadas regiões brasileiras, por proporcionar um rápido crescimento volumétrico, atingindo cerca de 20 a 40 m de altura e 100 cm de diâmetro altura do peito (DAP); boa forma de fuste e sem dificuldades no processo de germinação para produção de mudas (Figura 2).

Sua madeira é adequada para múltiplos usos, tanto em sistemas agroflorestais, plantios homogêneos e consórcios, tornando-se uma das espécies nativas mais utilizadas para reflorestamentos atualmente (RIBEIRO, 2011). É considerada promissora para produção de

painéis aglomerados (IWAKIRI et al., 2010), suas fibras é utilizada pela empresa Rio Concrem em parte da composição de chapas MDF. Além da produção de pasta celulósica. Como produto não madeireiro, a casca do paricá é utilizada com fins medicinais para o combate de diarreia e hemorragia uterina (CARVALHO, 2007).

Figura 2 – Imagem das plantas jovens de (*Schizolobium amazonicum* Ex Duck), utilizadas no experimento.



Fonte: Autor.

A espécie ocorre em quase todo o Brasil, com exceção da Região Sul, encontrando-se na Amazônia brasileira em florestas secundárias de terra firme e várzea alta, principalmente nos estados do Pará, Rondônia, Amazonas, Mato Grosso (CARVALHO; VIÉGAS, 2004) e também no estado do Acre (LOBÃO et al., 2012) e em algumas regiões do Nordeste do país (VIDAURRE et al., 2012). Sua ocorrência perfaz fronteiras como Bolívia, Colômbia, Costa Rica, Equador, Honduras e Peru (REIS; PALUDZYSZYN FILHO, 2011).

Os primeiros registros com o plantio de paricá no Estado do Pará constam da década de 1950, os quais tinham o objetivo de preservar a característica da floresta amazônica em espaços públicos e de fomentar estudos sobre o comportamento e características das espécies plantadas (MARQUES et al., 2006). Desde então, muitos plantios foram registrados no Pará, e em toda região amazônica e vários estudos foram desenvolvidos, podendo-se destacar: Hoffmann (2009), Vidaurre et al. (2012), Santos (2012) e Corteletti (2013), que trabalharam com povoamentos de paricá localizados entre os municípios de Dom Elizeu e Paragominas, estado

do Pará. Segundo dados da ABRAF (2012), as áreas plantadas com paricá superaram os 85 mil há. Atualmente, o Brasil possui área de árvores plantadas – eucalipto, pinus, acácia, araucária, paricá e teca, entre outras, que supera a 7,7 milhões de hectares (MENDES, 2016).

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI 2015) o que caracteriza o seu excelente crescimento, desenvolvimentos e sobrevivência dos plantios de paricá nessas regiões, são as condições de clima quente e com alta umidade, com precipitação elevada e sem muitas variações de clima.

As plantas de paricá são excelentes monitores biológicos de poluentes atmosféricos, pois apresentam uma sensibilidade relativamente maior em relação aos animais, possuem uma grande variabilidade genética entre e dentro das espécies, exibem sintomas foliares característicos de exposição a poluentes (SANTOS et al., 2012). Além disso, segundo os mesmos autores por serem imóveis, permitem uma avaliação mais precisa sobre uma área específica, pois estão fortemente integradas no ambiente em que vivem, discriminando a distribuição espacial do impacto.

Metais pesados absorvidos por essas espécies lenhosas ficam por um tempo maior imobilizados nos tecidos, retardando o seu retorno ao solo. Isto devido ao maior volume do sistema radicular que proporciona maior absorção de elementos químicos. Além disso, a fitorremediação com arbóreas leguminosas pode levar a melhoria dos solos devido à solubilização de nutrientes e a fixação do nitrogênio atmosférico em associação com bactérias nitrificantes. A qualidade e quantidade da matéria orgânica são melhoradas, podendo ainda, transformar importantes propriedades dos solos com porosidade, aeração e umidade (JESUS et al., 2015).

Por apresentar determinadas características como a capacidade de desenvolvimento em solos com baixa disponibilidade de nutrientes, sistema radicular profundo, alta taxa de crescimento e elevada produção de biomassa, têm sido sugeridas como planta apropriada para fitorremediação de solos contaminados por metais pesados (SHUKLA et al., 2011).

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 ferramenta consiste na descontaminação de áreas afetadas por estes metais que prejudicam o ambiente.

Portanto, parâmetros social, ambiental e econômico, estão em pauta quando se aborda poluição ambiental por metais pesados, tornando-se necessário desenvolver estratégias que

busquem reduzir a absorção e a toxicidade desse elemento em plantas, e com isso reduzir os riscos relacionados à introdução do mesmo nas cadeias alimentares, seja animal ou humana.

Em virtude disso, o presente estudo tem por objetivo avaliar o comportamento Fisiológico, de crescimento e bioquímico em plantas jovens de paricá quando submetidos a diferentes concentrações de cádmio.

REFERÊNCIAS

- ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo de Cerrado sob plantio direto de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 6, p. 923-934, 2005.
- ALVES, J. C.; SOUZA, A. P.; PÔRTO, M. L.; ARRUDA, J. A.; TOMPSON JÚNIOR, U. A.; SILVA, G. B.I; ARAÚJO, R. C.; SANTOS, D. Absorção e distribuição de chumbo em plantas de vetiver, jureminha e algaroba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.1329-1336, 2008.
- AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY - ATSDR. Toxic substances portal. Disponível em: <http://www.atsdr.cdc.gov/>. acesso em 17 de setembro de 2018.
- MENDES, L. et al. Anuário brasileiro da silvicultura 2016 – Santa Cruz do Sul : Editora Gazeta Santa Cruz, 2016. 56 p.
- ALI, H.; KHAN, E.; SAJAD, M. A. Phytoremediation of heavy metals: concepts and applications. **Chemosphere**, v.91, p. 869-881, 2013.
- BURZYNSKI, M.; KLOBUS, G. Changes of photosynthetic parameters in cucumber leaves under Cu, Cd, and Pb stress. **Photosynthesis**, v. 42, p. 505–510, 2004.
- CHANG, A. C.; PAGE, A. L.; WARNEKE, J. E.; GRGUREIV, E. Sequential extraction of soil heavy metals following a sludge application. **Journal Environmental Quality**, v.13, n.1, p.33-38, 1994.
- CARVALHO, J. G.; VIÉGAS, I. J. M. Caracterização de Sintomas de Deficiências de Nutrientes em Paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). Embrapa: Circular Técnica. ISSN 1517-211X. (Circular Técnica). 2004.
- CARVALHO, P.E.R. Paricá: *Schizolobium amazonicum*. Embrapa: Colombo, 2007, 8p. (Circular Técnica 142).
- COUTINHO, H. D.; BARBOSA, A. R. Fitorremediação: Considerações gerais e características de utilização. *Silva Lusitana*. Lisboa. v.15, n.1, p. 103-117, 2007.
- CHAVES, L. H. G.; MESQUITA, E. F.; ARAUJO, D. L.; FRANÇA, C. P. Acúmulo e distribuição de cobre e zinco em mamoneira cultivar BRS Paraguaçu e crescimento da planta. *Engenharia-Ambiental-Espirito Santo do Pinhal*, v.7, n. 3, p. 263-277, 2010.
- CORTELETTI, R. B. **Análise de tronco aplicada à avaliação de crescimento de árvores de paricá**. 2013. (82f.). Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2013.
- CETESB, 2012 - Divisão de Toxicologia, Genotoxicidade e Microbiologia Ambiental. Cádmiio e seus compostos. Ficha de informação toxicológica – FIT. Disponível em:<<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/laboratorios/fit/cadmio.pdf>> Acessado em 03/08/2018.

CHOPPALA, G.; SAIFULLAH; BOLAN, N.; BIBI, S.; IQBAL, M.; RENGEL, Z.; KUNHIKRISHNAN, A.; ASHWATH, N.; Ok, Y.S. Cellular mechanisms in higher plants governing tolerance to cadmium toxicity. **Critical Reviews in Plant Sciences**. v. 33, n. 5, p. 374-391, 2014.

DIAS, M. C.; MONTEIRO, C.; MOUTINHO-PEREIRA, J.; CORREIA, C.; GONÇALVES, B.; SANTOS, C. Cadmium toxicity affects photosynthesis and plant growth at different levels. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, p. 1281-1289, 2013.

DALCORSO, G.; FARINATI, S.; FURINI, A. Regulatory networks of cadmium stress in plants. Review Article. **Plant Signaling & Behavior**. v. 5, n. 6, p. 663- 667, 2010.

DALCORSO, G.; MANARA, A.; FURINI, A. An overview of heavy metal challenge in plants: from roots to shoots. The Royal Society of Chemistry. **Metallomics**. v. 5, p. 1117- 1132, 2013.

GABE, U.; RODELLA, A. Trace elements in Brazilian agricultural limestones and mineral fertilizers. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.30, n.5/6, p.605-620, 1999.

GUILHERME, L. R. G., MARQUES, J. J. G.; PIERANGELI, M. A. P.; MARCHI G. . Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos. In: TORRADO-VIDAL, P.; ALLEONI, L.R.F.; COOPER, M. & SILVA, A.P., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.4. p.345-390, 2005.

GUILHERME, L. R. G. **Poluição do solo e qualidade ambiental**. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 27. 1999. Brasília. Anais...Brasília: SBCS, 1999, CD-Rom.

GRATÃO, P.L.; MONTEIRO, C.C.; ROSSI, M.L.; MARTINELLI, A.P.; PERES, L.E.P.; MEDICI, L.O.; LEA, P.J.; AZEVEDO, R.A. Differential ultrastructural changes in tomato hormonal mutants exposed to cadmium. **Environmental and Experimental Botany**, v. 67, p. 387–394, 2009.

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

JESUS, T. B.; SOUZA, S. S.; SANTOS, L. T. S. O.; AGUIAR, W. M. Avaliação da Potencialidade de Utilização de Espécies de Macrófitas como Acumuladoras de Metais Pesados. **Revista Virtual de Química**, v.7, n.4, p.1102-1118, 2015.

HERNANDEZ, L. E.; CARPENA-RUIZ, R.; GARATE, A. Alterations in the mineral nutrition of pea seedlings exposed to cadmium. **Journal Plant Nutritional**, New York, n. 19, p.1581-1598, 1996.

HALL, J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. **Journal of Experimental Botany**. Reino Unido. v.53, n.366, p. 1-11, 2002.

HASAN, S. A.; FARIDUDDIN, Q.; ALI, B.; AHMAD U. Cadmium: toxicity and tolerance in plants. **Journal of Environmental Biology**, Lucknow, v. 30, n. 2, p. 165-174, 2009.

HOFFMANN, R. G. **Caracterização dendrométrica e avaliação do rendimento em laminação de madeira em plantios de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke) na região de Paragominas, PA.** 2009. (97f.). Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2009.

IWAKIRI, S.; MATOS, J.L.M.; PINTO, J.A.; VIANA, L.C.; SOUZA, M.M. Produção de painéis laminados unidirecionais - LVL com lâminas de *Schizolobium amazonicum*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda*. *Cerne*, v.16, n.4, p.557-563, 2010.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants.** 3 ed. Boca Raton: CRC Press, 2001. 413p.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soil and plants.** 4 ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 505p.

LAEGREID, M. BOCKMAN, O. C.; KAARSTAD, O. **Agriculture fertilizers and environment.** Wallingford: CAB, 1999. 294p.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras, Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil.** 4 ed. v. 01. SP: Instituto Plantarum. Nova Odessa. 2002. 368p.

LUX, A. MARTINKA, M.; VACULIK, M.; WHITE, P. J. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 1, p. 21-37, 2011.

LOBÃO, M.S.; COSTA, D.P.; ALMONACID, M.A.; TOMAZELLO FILHO, M. Qualidade do lenho de árvores de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, Acre, Brasil. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 3, p. 374-384, 2012.

MALAVOLTA, E. **Fertilizantes e seu impacto ambiental, micronutrientes e metais pesados: mitos, mistificação e fatos.** São Paulo, ProduQuímica, 1994. 153 p.

McLAUGHLIN, M.J.; SINGH, B.R. Cadmium in soils and plants: a global perspective. In: McLAUGHLIN, M.J.; SINGH, B.R. (Ed). **Cadmium in soils and plants.** Dordrecht: Kluwer Academic, 1999. 269 p.

MARQUES, L. C. T.; YARED, J. A. G.; SIVIERO, M.A. A evolução do conhecimento sobre o paricá para reflorestamento no Estado do Pará. Embrapa Amazônia Oriental, 2006. 5 p. (Comunicado Técnico, 158).

MONTEIRO, C.C.; CARVALHO, R.F.; GRATÃO, P.L.; CARVALHO, G.; TEZOTTO, T.; MEDICI, L.O.; PERES, L.E.P.; AZEVEDO, R.A. Biochemical responses of the ethylene-insensitive never ripe tomato mutant subjected to cadmium and sodium stresses. **Environmental and Experimental Botany**. v. 71, p. 306-320, 2011.

MALIK N; BISWAS AK. Role of higher plants in remediation of metal contaminated sites. *Scientific Reviews & Chemical Communications*. v. 2, n. 2, p. 141–147, 2012.

MOHAMED, A.A.; CASTAGNA, A.; RANIERI, A.; SANITÀ DI TOPPI, L. Cadmium tolerance in Brassica juncea roots and shoots is affected by antioxidant status and phytochelatin biosynthesis. **Plant Physiology and Biochemistry**. v. 57, p. 15-22, 2012.

- MARTINS, L.L.; REIS, R.; MOREIRA, I.; PINTO, F.; SALES, J.; MOURATO, M. “**Antioxidative Response of Plants to Oxidative Stress Induced by Cadmium**” Capítulo 3, in Cadmium: Characteristics, Sources of Exposure, Health and Environmental Effects. Ed. Mirza Hasanuzzaman & Masayuki Fujita. Nova Science Publishers, Inc. Nova Iorque. EUA. 2013.
- NAGAJYOTI, P.; LEE, K.; SREEKANTH, T. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. **Environmental Chemistry Letters**, Germany, v. 8, n. 3, p. 199-216, 2010.
- PROCHNOW, L.I.; PLESE L.; ABREU, M. F. Bioavailability of cadmium contained in single superphosphates produced from different brazilian raw materials. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.32, n.1-2, p.283-294, 2001.
- PRASAD, M. N. V. **Heavy Metal Stress in Plants**. From Biomolecules to Ecosystems. 2 ed. Springer. Berlin, Alemanha. 2004. 455p.
- REIS, C.A.F.; PALUDZYSZYN FILHO, E. **Estado da arte de plantios com espécies florestais de interesse para o Mato Grosso**. Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 63 p. (Documentos, 215).
- ROSA, L. S. Características Botânicas, anatômicas e tecnológicas do Paricá (*Schizolobium amazonicum* Huberr ex Ducke). **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 46, n. 1, p. 63-80, 2011.
- RIBEIRO, I. O. **Zoneamentos edafoclimáticos de *Hevea brasiliensis*, *Pinus elliottii* e *Schizolobium Amazonicum*, utilizando análise multicritério**. p 66. 2011. Monografia (Engenharia Florestal) apresentada a Universidade Federal do Espírito Santo, 2011.
- ROY, S. K.; CHO S. W.; KWON, S. J.; KAMAL, A. H.; KIM, S. W.; OH, M. W.; LEE, M. S.; CHUNG, K. Y.; XIN, Z.; WOO, S. H. Morpho-physiological and proteome level responses to cadmium stress in sorghum. **PLoS ONE**, v. 11, n.11, p. 1-27, 2016.
- 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.
- SANDÁLIO, L. M.; DALURZO, H. C.; GOMEZ, M.; ROMERO-PUERTAS, M. C.; DEL RIO, L. A. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. **Journal of Experimental Botany**. v. 52, p. 21215-21265, 2001.
- SOARES, C.R.F.S.; SIQUEIRA, J.O.; CARVALHO, B.J.G. Fitotoxidez de cádmio para *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, p.175-183, 2005.
- SILVA, M. L. S.; VITTI, G. C.; TREVIZAM, A. R. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v.42, p.527-535, 2007.

SOUZA, V. L.; SILVA, D. C.; 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.

SANTOS, O. M.; GUEDES, M. L. S.; ARAÚJO, C. V. M. Potencial de espécies vegetais nativas do pólo industrial de Camaçari (BA, Brasil) como acumuladoras de elementos químicos contidos na poluição atmosférica. **Journal Brasileiro Sociedade Ecotoxicologica**, Vale do Itajaí, v. 7, n. 1, p. 15-20, 2012.

SANTOS, E. M. **Crescimento e produção de plantios de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke) sob diferentes espaçamentos**. 2012. (74f.). Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro, ES, 2012.

SHUKLA, O. P.; JUWARKAR, A. A; SINGH, S. K. et al. Growth responses and metal accumulation capabilities of woody plants during the phytoremediation of tannery sludge. *Waste management* (New York, N.Y.), v. 31, n. 1, p. 115-23, 2011.

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

TENÓRIO, J. A. S.; ESPINOSA, D. C. R. Efeitos do cádmio. Ambiente Brasil-Portal ambiental.<www.ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/pilhas_e_baterias/efeitos_do_cadmio.html> Acesso em: 14 dez. 2018.

TANG, H.; LIU, Y.; GONG, X.; ZENG, L.; ZHENG, B.; WANG, D.; SUN, Z.; ZHOU, L.; ZENG, X. Effects of selenium and silicon on enhancing antioxidative capacity in ramie (*Boehmeria nivea* (L.) Gaud.) under cadmium stress. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n.13, p. 9999-10008, 2015.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. The Great Waters Program - Third Report to Congress. Columbus: USEPA; 2011.

VITÓRIA, A. P.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Antioxidant enzymes responses to cadmium in radish tissues. **Phytochemistry**, v. 57, p. 710-715, 2001.

VARENNE, A. **Produtividade dos Solos e Ambiente**. Escolar (Ed.). Lisboa. 2003.

VIDAURRE, G. B.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, R. C. S.; VALLE, M. L. A. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de paricá (*Schizolobium amazonicum*). *Árvore*, Viçosa-MG, v.36, n.2, p.365-371, 2012.

WHO, UNICEF. "UNFPA, The World Bank. Trends in maternal mortality: 1990 to 2010." WHO, UNICEF, UNFPA and The World Bank estimates. p. 59. 2012.

WANG, S., VINCENT, T., FAUR, C., GUIBAL, E. Alginate and Algal-Based Beads for the Sorption of Metal Cations: Cu (II) and Pb(II). **Internatíonal Journal of Molecular Sciences**, v. 17, n. 9, p. 1453, 2016.

YADAV, S. K. Heavy metals toxicity in plants: an overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. **South African Journal of Botany**, v. 76, n. 2, p. 167-179, 2010.

2 - HIPÓTESES E OBJETIVOS DA PESQUISA

2.1 - HIPÓTESES

- As plantas de paricá apresentarão características de fitorremediação ao cádmio;
- As características fisiológicas e de crescimento sofrerão alterações em função das doses crescentes de cádmio;
- As rotas metabólicas a nível de carbono e nitrogênio sofrerão mudanças frente as doses crescentes de cádmio.

2.2 - OBJETIVOS

2.2.1 - Objetivo geral

- Avaliar os parâmetros fisiológicos, de crescimento e bioquímicos de plantas jovens de (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) quando submetidas em diferentes concentrações de cádmio.

2.2.2 - Objetivos específicos

- Definir por meio de análises químicas a acumulação de concentrações de cádmio em mudas de paricá;
- Analisar por meio de variáveis fisiológicas (fotossíntese, condutância estomática, transpiração, a relação Ci/Ca, eficiência instantânea de carboxilação (EiC), eficiência do uso da água (EUA), eficiência intrínseca do uso da água (EiUA) e de crescimento (altura, diâmetro do coleto, número de folhas e número de folíolos) o comportamento de mudas de paricá submetidas a aplicação crescente de cádmio (CdCl_2 178 μM ; CdCl_2 356 μM ; CdCl_2 534 μM ; CdCl_2 712 μM);
- Verificar por meio do comportamento metabólico do carbono (sacarose, carboidratos solúveis totais, açúcares redutores), e nitrogênio (nitrato, redutase do nitrato, amônio, aminoácidos, proteínas, prolina, glicina os efeitos de doses crescentes de cádmio (CdCl_2 178 μM ; CdCl_2 356 μM ; CdCl_2 534 μM ; CdCl_2 712 μM) em plantas jovens de paricá.

3 - RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E DE CRESCIMENTO DE MUDAS DE (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) SUBMETIDAS A DOSES DE CÁDMIO

Artigo aceito para publicação na revista Journal of Agricultural Science no Vol. 11, No. 3, in February 2019.

RESUMO

O cádmio é um metal importante devido ao uso industrial, e por ser considerado um dos mais perigosos devido ao acúmulo no meio ambiente e por ter alta mobilidade no sistema solo-planta, podendo vim afetar os mecanismos fisiológicos e de crescimento das plantas. Dentre os vegetais que possivelmente pode ser afetado por esse metal está a espécie (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke), conhecida como paricá. Nativa da região Amazônica, apresenta grande potencial social, econômico e ambiental. O objetivo deste trabalho foi avaliar, por meio de variáveis fisiológicas e de crescimento, o comportamento de mudas de paricá submetidas a aplicação crescente de cádmio. As variáveis fisiológicas diminuíram significativamente devido ao aumento das doses de cádmio, alterando a fotossíntese, condutância estomática e transpiração, entre as variáveis correlacionadas, a variável eficiência intrínseca do uso da água (EiUA), apresentou tolerância em relação às altas doses de cádmio, evidenciando uma tentativa de manutenção do crescimento. Para as variáveis de crescimento, o cádmio proporcionou uma diminuição da altura, diâmetro à medida que as concentrações eram aumentadas. Esses resultados mostraram que as plantas do paricá foram sensíveis às doses crescentes de cádmio.

Palavras-chave: Estresse Abiótico. Variáveis Biofísicas. Metal Pesado.

ABSTRACT

The cadmium is a important metal due the industrial use, and because it is considered one of the most dangerous due to the accumulation in the environment and to have high mobility in the soil-plant system, being able to affect the physiological and plant growth mechanisms. Among the plants that may possibly be affected by this metal is paricá, a native species from the Amazon region, which presents great social, economic and environmental potential. Therefore, the objective of this work is to evaluate, by means of ecophysiological and growth variables, the behavior of paricá seedlings submitted to increasing cadmium application. The physiological variables decreased significantly due to the increase of the cadmium doses, altering the photosynthesis, stomatal conductance and transpiration, among the correlated variables, the variable Intrinsic Efficiency of water use (E_iUA), presented tolerance in relation to high doses of cadmium, evidencing an attempt to maintain growth. For the biophysical variables, cadmium provided a decrease as doses were increased. Decreasing height and diameter. These results showed that paricá plants were sensitive to increasing doses of cadmium.

Key words: Abiotic stress. Biophysical variables. Heavy metal.

3.1- INTRODUÇÃO

A toxicidade por metais pesados depende da sua concentração e biodisponibilidade no solo, do tempo de exposição ao elemento, do genótipo da planta, bem como das condições gerais da mesma. Além disso, a dose-resposta, ou seja, a concentração que causará um efeito específico varia entre os elementos essenciais e não essenciais (ALMEIDA, 2015).

O cádmio é considerado um elemento não essencial aos vegetais por não apresentar função metabólica (OK et al., 2011). É um elemento extremamente tóxico aos organismos mesmo em concentrações no solo abaixo de 10 mg kg^{-1} , essa quantidade já é suficiente para proporcionar efeitos acentuados no crescimento vegetal. Dentre os efeitos mais comuns da toxicidade de cádmio em plantas estão a redução do crescimento, principalmente o das raízes por deficiências minerais (SHAH et al., 2001; VITÓRIA et al., 2001; FORNAZIER et al., 2002), assim como na produção de biomassa (KNECHT et al.; 1994; SOLTAN; RASHED, 2003; BENAVIDES et al., 2005). Também causa a desestabilização do aparato fotossintético (QIAN et al., 2010) e modificações na condutância estomática e transpiração foliar (SOUZA et al., 2011).

A importância de se conhecer os mecanismos de crescimento e tolerância dos vegetais contra esse elemento químico, se deve a sua crescente concentração aos solos agrícola, principalmente pelo o uso de fertilizantes fosfatados, que constituem uma das fontes mais importantes de contaminação de cádmio na agricultura (FRANÇOIS, 2009; GRANT, 2010; FERREIRA, 2013). Assim como, para produção de alimentos e saúde ambiental em âmbito global, pois ele é considerado um potencial perigo agrícola (RÖMKENS et al., 2011).

Em virtude dessas circunstâncias o presente trabalho tem por objetivo, avaliar por meio de variáveis fisiológicas e de crescimento o comportamento de mudas de paricá submetidas a aplicação crescente de cádmio.

3.2- MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1- Condição experimental e material vegetal

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação do Instituto de Ciências Agrárias (ICA), pertencente a Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), localizado em Belém-Pará, com coordenadas geográficas de $01^{\circ} 27' 21'' \text{ S}$ e $48^{\circ} 30' 16'' \text{ W}$. No período de dezembro

de 2017 a junho de 2018. Foram utilizadas sementes de paricá fornecidas pela AIMEX (Associação das Indústrias Exportadoras de Madeira do Estado do Pará).

3.2.2- Produção de mudas e exposição das plantas às dosagens de cádmio

O processo para produção de mudas de paricá procedeu com escarificação das sementes com lixa 80 e submersão em água fria por um período de 24h para facilitar a quebra de dormência. Após esse período as mesmas foram colocadas em vasos tipo Leonard com capacidade de 4,6 L adaptados com garrafas pet contendo areia lavada e autoclavada, com quatro sementes por vaso, os vasos foram envolvidos com papel alumínio (para minimizar a interferência da radiação solar no crescimento radicular). Foi colocada na superfície de cada vaso, papel Etil Vinil Acetato (EVA) em forma de círculos, para evitar a proliferação de algas. Decorridos dois meses da semeadura foram aplicadas as concentrações de cádmio na forma de cloreto de cádmio, sendo as concentrações (CdCl_2 178 μM ; CdCl_2 356 μM ; CdCl_2 534 μM ; CdCl_2 712 μM) em solução nutritiva de (SARRUGE, 1975). As soluções foram renovadas semanalmente e o pH mantido entre 5,8 a 6,0 com adição de hidróxido de sódio (NaOH) ou ácido clorídrico (HCl) 0,1 mol L⁻¹.

3.2.3- Variáveis Ecofisiológicas

A avaliação das plantas para análise fisiológica e de crescimento foram realizadas quando as mesmas começaram a demonstrar sinais de toxidez por cádmio. Para as avaliações da taxa fotossintética líquida (*A*), condutância estomática (*gs*), transpiração (*E*), foram utilizados o medidor portátil IRGA (Infra-red Gas Analyser/ADC equipments - mod. LCI 6400, Hoddesdon, UK) sendo medidas sob condições ambientais favoráveis, entre as 9:00 h e 11:00 h da manhã. Para a retirada dessas variáveis foram inseridos na câmara do equipamento um folíolo por planta sempre na região mediana da folha totalmente expandida. Após a retirada desses dados, pode-se quantificar também a relação do carbono intracelular e do ambiente (*Ci/Ca*), eficiência instantânea de carboxilação (*EiC*), eficiência do uso da água (*EUA*), eficiência intrínseca do uso da água (*EiUA*).

3.2.4- Determinação dos Teores de Clorofila *a*, *b*, total (*a+b*) e antocianina

O método estabelecido para as variáveis clorofila *a*, clorofila *b* e antocianina foram conforme a metodologia proposta por Sims; Gamon, (2002). Pesou-se 100 mg de folha fresca de cada amostra, colocando em um almofariz, contendo 3mL de acetona 80%, seguindo maceração e posteriormente, filtração com papel toalha. Transferiu-se o sobrenadante para um balão volumétrico de 25 mL e o volume foi aferido com acetona 80%. As amostras foram lidas em espectrofotômetro à 663nm (Clorofila A), 647 nm (Clorofila B) e 537 nm (Antocianinas) colocando anteriormente o branco para zerar o aparelho (acetona 80%). O teor de clorofilas totais foi obtido através de cálculo simples: Clorofila total = clorofila *a* + clorofila *b*. Toda a extração foi feita no gelo e no escuro.

3.2.5- Variáveis de Crescimento

As determinações para os parâmetros de crescimento foram baseadas em mensurações realizadas no final do período experimental em torno de 15 dias, obtendo as seguintes variáveis:

1. Altura de planta: medida da superfície do solo até o ápice da planta, através do uso de uma régua milimetrada. O resultado foi expresso em cm.
2. Diâmetro do coleto: medido utilizando-se um paquímetro digital 200 mm o resultado foi expresso em mm.
3. Número de folhas: foi realizado a contagem do número de folhas vivas.
4. Número de folíolos: foi realizado a contagem do número de folíolos vivos.

3.2.6- Delineamento experimental e análise estatística

Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), com 5 tratamentos sendo constituídos de plantas controle (sem cádmio) e com doses de cádmio (CdCl_2 178 μM ; CdCl_2 356 μM ; CdCl_2 534 μM ; CdCl_2 712 μM) com 7 repetições e uma planta/vaso totalizando 35 unidades experimentais.

Os dados obtidos foram submetidos análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$) e as médias foram comparadas pela diferença mínima significativa do teste do Tukey ($p < 0,05$) e submetidas ao teste deregressão usando-se o programa Sisvar (FERREIRA, 2011).

3.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1- Fotossíntese

Os resultados apresentados para a fotossíntese das mudas de paricá mostraram que a medida que as doses de cádmio aumentavam o processo fotossintético diminuía, ocasionando diferenças estatísticas com as plantas controles. O percentual relativo de redução e aumento (PRA) foi bastante alto chegando a menos 76% de decréscimo (Tabela 1).

Essa característica pode ser considerada como um indicador de sensibilidade ao estresse causado por cádmio. Os efeitos do cádmio no processo fotossintético estão no bloqueio da dissipação da energia na forma de calor (ATP), impedindo assim, que a energia seja absorvida nos centros de reação do fotossistema II. Isso se deve a desestruturação dos tilacoides, reduzindo sua eficiência fotoquímica (PARMAR et al., 2014). Outra explicação provável para esse resultado, está na inibição direta da síntese de clorofila ou de restrições na absorção e translocação de Mg, o magnésio quando presente nos cloroplastos atua como protetor, inibindo a ação do cádmio, impedindo o transporte de elétrons (BENAVIDES et al., 2005; MARTINS et al., 2013, ZHANG et al., 2014).

3.3.2- Condutância estomática (*gs*)

A condutância dos estômatos diminuiu consideravelmente com os aumentos das dosagens de cádmio, contudo, diferenças estatísticas ocorreram somente nos tratamentos T3 (356 μM), T4 (534 μM) e T5 (712 μM) quando comparado com as plantas controle. O percentual relativo de redução e aumento (PRA) ficou acima de 70% de decréscimo (Tabela 1), esse resultado demonstra o quanto foi alterado a condutância estomática.

O cádmio diminui a pressão parcial de CO_2 nos estômatos, diminuindo a sua concentração e a condutância estomática, conseqüentemente ocorreu o fechamento dos estômatos e a diminuição da transpiração, sendo a atividade da Rubisco também afetada (HASANUZZAMAN et al., 2013). Um dos efeitos prejudiciais do cádmio está na indução de cálcio do retículo endoplasmático e do vacúolo, aumentando os níveis desse cátion no citosol, o que está relacionado com o fechamento estomático (PERFUS-BARBEOCH et al., 2002).

3.3.3- Transpiração (*E*)

Os resultados apresentados para transpiração foram semelhantes às da fotossíntese e condutância estomática, haja vista, que essas variáveis apresentam correlações diretas. Essa diminuição da transpiração chegou a valores de - 54, 75% de percentual relativo de redução e aumento (PRA), isso possibilitou diferenças estatísticas nos maiores tratamentos com cádmio T4 (534 μM) e T5 (712 μM), quando comparado com as plantas controles (Tabela 1).

Segundo Leita et al. (1995), o cádmio interfere na abertura e fechamento dos estômatos. Primeiramente devido a um aumento no potencial osmótico das folhas, em um segundo momento, em função da ação direta do cádmio nas células-guarda e também devido à inibição no crescimento das raízes que limita a absorção de água e promove o fechamento dos estômatos e, quando a concentração do elemento químico se torna elevada, há um declínio metabólico, com perda da turgidez foliar e fechamento estomático hidropassivo.

3.3.4- Eficiência do uso da água (EUA)

De acordo com Zhao (2004), a eficiência do uso da água (EUA) é definida em termos fisiológicos como a razão estabelecida entre a taxa de fixação de carbono (fotossíntese) e a taxa de transpiração (A/E). Logo, quando analisado essa razão mostrou que as concentrações de cádmio diminuíram essa eficiência à medida que as concentrações eram aumentadas. Ocasionalmente diferenças estatísticas quando comparado as plantas controle. O percentual relativo de redução e aumento para essa variável foi acima de - 45% (Tabela 1). Isso corrobora com (Lefèvre et al., 2014) que afirmaram que o estresse por metais pesados ocasiona menor eficiência no uso da água.

Esse resultado evidencia uma baixa fixação de CO_2 , haja vista, que esse parâmetro determina a efetividade das espécies de fixar carbono enquanto transpiram. O elemento fito tóxico acumulou-se no sistema radicular, interferindo diretamente no crescimento desse órgão, isso provavelmente proporcionou uma baixa absorção de água, e alterações na anatomia dos vasos condutores refletindo diretamente no transporte de água (BACELAR et al., 2007).

3.3.5- Eficiência instantânea de carboxilação (EiC)

A EiC avalia a relação entre fotossíntese e concentração interna de gás carbônico (A/C_i), logo, os resultados apresentados para a essa variável, mostraram que houve um decréscimo,

ocasionando diferenças estatísticas quando comparado as plantas controle, o (PRA) percentual relativo de redução e aumento obteve um valor de decréscimo de - 76,66% (Tabela 1). A E_iC depende da disponibilidade de CO_2 no mesófilo foliar, quantidade de luz, temperatura e da atividade enzimática para que haja fotossíntese. Nesse estudo a abertura estomática foi diminuída acentuadamente, logo influenciando as concentrações de CO_2 intercelulares ficando muito baixas, e o influxo deste componente nas células do mesófilo é restringido, assim, a planta utiliza o CO_2 proveniente da respiração para manter um nível mínimo de taxa fotossintética, tornando-a limitada (TAIZ; ZEIGER, 2017).

3.3.6- Eficiência intrínseca do uso de água (E_iUA)

A E_iUA é calculada entre a divisão da fotossíntese e condutância estomática (A/g_s). Os resultados para eficiência intrínseca do uso da água (E_iUA) mostraram que com as altas doses de cádmio aumentavam-se a eficiência interna do uso da água das plantas sob estresse. Quando comparado as plantas controle as diferenças estatísticas aconteceram somente com o T2 ($178\mu M$). O percentual relativo de redução e aumento (PRA) foi de 2,99 % conforme Tabela 1. Essa elevada E_iUA é uma característica de plantas que tentam tolerar a condição estressante em virtude de uma baixa disponibilidade de água (MA et al., 2004), Salienta-se que quanto menor a disponibilidade de água menor também será o grau de abertura estomática para reduzir a perda d'água; conseqüentemente, a E_iUA é maior mantendo o mínimo de equilíbrio hídrico.

3.3.7- Concentração interna e do ambiente de CO_2 (C_i/C_a)

As relações interna e externa de carbono aumentaram nos dois primeiros tratamentos sob estresse T2 ($178\mu M$) e T3 ($356\mu M$), ocorrendo um decréscimo no T4 ($534\mu M$) e voltando a aumentar no T5 ($712\mu M$). Diferenças estatísticas ocorreram entre os T2 ($178\mu M$) e T4 ($534\mu M$), quando comparado as plantas controle. O percentual de redução e aumento (PRA), foi de 2 % (Tabela 1).

É possível que a atividade das enzimas envolvidas na fixação do CO_2 tenha sido afetada, isso levou aumento nos valores de C_i/C_a nos dois primeiros tratamentos. A redução na transpiração nas plantas sob estresse pelo elemento tóxico cádmio pode estar relacionada com a destruição da cutícula e dos estômatos e o rompimento do limbo foliar, conduzindo diretamente a reduções na g_s , interferindo nessa relação (GUERRA et al., 2014).

3.3.8- Clorofila *a* e *b* e total

Os teores de clorofilas *a* nas plantas sob estresse pelo metal pesado decresceram quando comparado as plantas controle, o menor valor de clorofila *a* nas plantas com metal foi o T3 (356 μM) e o maior valor ficou para as plantas no T5 (712 μM). Diferenças estatísticas ocorreram em T2 (178 μM), T3 (356 μM) e T4 (534 μM), quando comparado as plantas controle. O (PRA) da clorofila *a* foram - 33,4% (Tabela 1).

Para os teores de clorofilas *b* ocorreram decrescimento até o T4 (534 μM), diferenças estatísticas entre as plantas sob estresse pelo metal não ocorreu, somente quando comparado as plantas controle. O percentual de redução e aumento (PRA) foi de - 37,26%, acima da clorofila *a* (Tabela 1).

Os teores de clorofila total (*a+b*) decresceram sob a condição de estresse por metal pesado, apresentando diferenças estatísticas quando comparado com as plantas controle, o menor valor apresentado de clorofila total foi para o tratamento T3 (356 μM). O percentual de redução e aumento (PRA) foi de -36,45% (Tabela 1). Comprovando a alteração das funções clorofilianas.

Houve uma degradação de clorofilas ao longo do estresse, e conseqüentemente a inibição do processo fotossintético em função da exposição ao cádmio. No entanto, para a maioria das espécies é necessária uma elevada concentração de metal pesado para que sejam detectados efeitos no sistema fotossintético (EKMEKCI et al., 2008; REDONDO-GOMÉZ et al., 2010; ROYCHOUDHURY et al., 2012; MARTINS et al., 2013). Fato observado nesse estudo onde foram aplicadas altas doses desse elemento. A degradação da clorofila ocorre devido à substituição de Mg na molécula de clorofila, e de Fe nos citocromos de proteínas envolvidas na fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2017; DALCORSO et al., 2008; MARQUES; NASCIMENTO, 2013).

O Mg é parte estrutural do núcleo tetrapirrólico da molécula de clorofila, mas tem também um papel específico na ativação de enzimas envolvidas na fotossíntese. A carência de Mg provoca cloroses entre as nervuras, verificando-se em primeiro lugar nas folhas mais velhas, devido à mobilidade deste elemento (TAIZ; ZEIGER, 2013). O Fe tem um papel importante como componente de complexos proteícos (ferredoxinas) envolvidos na transferência de elétrons na fase luminosa da fotossíntese. Em ambos os casos, tanto para a carência de Mg como de Fe, há um sintoma característico que são as cloroses entre nervuras. Em contraste com Mg, as cloroses resultantes de falta de ferro, surgem inicialmente nas folhas mais jovens, porque o ferro não pode ser prontamente mobilizado a partir de folhas mais velhas (TAIZ; ZEIGER,

2013). DalCorso et al. (2008) referem que as cloroses podem surgir de alterações na razão Fe/Zn, bem como por efeitos negativos no metabolismo da clorofila, causados pelo cádmio.

3.3.9- Antocianina

Os teores de antocianina de um modo geral diminuíram quando comparado as plantas controle, havendo diferenças estatísticas com os tratamentos T2 (178 μ M), T3 (356 μ M) e T4 (534 μ M). Isso pode ser comprovado pelo valor do percentual de redução e aumento (PRA) que foi de -24,51% (Tabela 1). Quando analisado entre os tratamentos sob estresse por cádmio houve um certo aumento dessa variável. Segundo os autores Keilig; Ludwig, (2009); Michalak (2006); Singh et al., (2013), isso é uma resposta esperada em se tratando de plantas cultivadas em presença de metais pesados em níveis problemáticos, essas plantas produzem metabólitos secundários, como por exemplo, flavonoides e antocianina, tendo esses a finalidade de eliminar compostos reativos de oxigênio formados pela presença desses metais como é o caso do cádmio.

3.3.10- Altura

Apesar do curto tempo de exposição das plantas de paricá ao metal pesado, o crescimento foi afetado negativamente, fato observado no valor do percentual de redução e aumento (PRA%), no valor de -14,17%, sinalizando a fitotoxicidade da espécie ao metal utilizado. A altura é um parâmetro de crescimento que demonstra a capacidade que as plantas possuem em responder à influência dos fatores bióticos e abióticos que norteiam o metabolismo e seu desenvolvimento (TAIZ; ZEIGER, 2017). Estatisticamente houveram diferenças significativas entre as plantas controle e as plantas com cádmio (Tabela 1).

3.3.11- Diâmetro do colo

A variável diâmetro do colo diminuiu com as doses crescentes de cádmio quando comparado as plantas controle, havendo diferenças estatísticas significativas com os tratamentos T2 (178 μ M), T3 (356 μ M) e T4 (534 μ M), o percentual de redução e aumento (PRA) foi de -14,41% de decréscimo. Mostrando a influencia negativa desse metal pesado no crescimento vegetal. De acordo com Ekmekçia et al. (2008) a redução nos teores de clorofila está fortemente ligada com redução na altura, diâmetro e alterações no crescimento em geral, devido principalmente a menor síntese de fotoassimilados.

3.3.12- Número de folhas e folíolos

Ocorreram decréscimo para o número de folhas a medida que as doses de cádmio eram aumentadas, contudo, diferenças estatísticas ocorreram somente nos tratamentos T4 (534 μM) e T5 (712 μM), quando comparado as plantas controle. O percentual de redução e aumento (PRA) foi de - 21,58%, demonstrando uma queda nessa variável de crescimento em função da toxicidade do cádmio.

Durante o período estabelecido de estresse pelo metal as plantas de paricá apresentaram sintomas de clorose nas folhas mais velhas, abscisão foliar e epinastia das folhas. Esses efeitos negativos alteram de forma preponderante o processo fotossintético e as demais funções fisiológicas desse vegetal. Nesse órgão, os íons metálicos podem ser incorporados dentro de proteínas ou translocados através do floema, juntamente com os fotoassimiladores, causando assim uma série de fitotoxicidades (AZEVEDO et al., 2012; GALLEGGO et al., 2012).

Para os números de folíolos foi observado uma diminuição até o T3 (356 μM), obtendo um aumento no T4 (534 μM) e voltando a cair no T5 (712 μM), o (PRA) foi de - 26,63% foi o maior nesse parâmetros de crescimento, mostrando que esse órgão é um dos mais afetados pela toxidez do cádmio (Tabela 1).

Tabela 1 - Médias, equações de regressão e percentual de redução e aumento (PRA) dos parâmetros relacionados a fisiologia e de crescimento na parte aérea e radicular das mudas de (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) submetidas à doses crescentes de cádmio.

Parâmetro	Doses de cádmio (µM)					CV (%)	PRA (%)	Equação de regressão	R ² (%)
	0	178	356	534	712				
Altura da planta (cm)	43.41 a	36.96 b	34.20 b	34.69 b	37.26 b	9.32	-14.17	$y = 43.2591 - 0.0424x + 4.8E-5x^2$ **	99.51
Diâmetro do colo (mm)	8.45 a	6.80 b	6.77 b	6.99 b	7.24 ab	12.01	-14.41	$y = 8.2769 - 0.0078x + 9.1175E-6x^2$ **	85.73
Nº de folhas	7.83 a	7.00 ab	7.00 ab	6.29 b	6.14 b	11.02	-21.58	$y = 7.6714 - 0.0023x$ **	91.63
Nº de folíolos	36.71 a	27.86 ab	24.50 b	28.57 ab	26.57 b	22.58	-27.63	$y = 35.7776 - 0.0449x + 4.7665E-5x^2$ *	80.71
Clorofila <i>a</i> (mmol. kg ⁻¹ MF)	2.89 a	1.29 bc	0.22 c	1.33 b	1.92 b	47.64	-33.40	$y = 2.8457 - 0.0116x + 1.483E-5x^2$ **	89.97
Clorofila <i>b</i> (mmol. kg ⁻¹ MF)	10.89 a	6.85 b	4.66 b	6.32 b	6.83 b	24.37	-37.26	$y = 10.6938 - 0.0257x + 2.9225E-5x^2$ **	92.43
Clorofila total (mmol. kg ⁻¹ MF)	13.78 a	7.49 bc	5.16 c	7.65 bc	8.76 b	22.78	-36.45	$y = 13.883 - 0.0585x + 0.0001x^2 - 7.8885E-8x^3$ *	98.24
Antocianina (mg.100g ⁻¹)	0.0047 a	0.0029 bc	0.0015 c	0.0024 bc	0.0036 ab	32.64	-24.51	$y = 0.0047 - 1.4829E-5x + 1.8663E-8x^2$ **	96.18
<i>A</i> (µmol m ⁻² s ⁻¹)	7.36 a	5.06 b	3.92 c	1.62 d	1.76 d	9.85	-76.11	$y = 7.4047 - 0.0142x + 8.3644E-6x^2$ **	97.12
<i>gs</i> (mmol m ⁻² s ⁻¹)	0.16 a	0.17 a	0.13 b	0.04 c	0.04 c	7.54	-74.53	$y = 0.1564 + 0.0004x - 2.2058E-6x^2 + 1.9235E-9x^3$ **	98.90
<i>E</i> (mmol m ⁻² s ⁻¹)	2.33 a	2.56 a	1.90 ab	1.26 bc	1.05 c	13.86	-54.75	$y = 2.3325 + 0.0046x - 2.3116E-5x^2 + 1.9812E-8x^3$ *	99.81
Ci/Ca (mol.mol ⁻¹)	0.79 b	0.87 a	0.80 b	0.62 c	0.77 b	11.87	-2.05	$y = 0.7809 + 0.0017x - 7.4323E-6x^2 + 7.0045E-9x^3$ **	93.07
EiC [(µmol m ⁻² s ⁻¹) (µmol mol ⁻¹) ⁻¹]	0.02 a	0.01 b	0.01 b	0.01 c	0.01 c	13.21	-76.66	$y = 0.023 - 4.0835E-5x + 2.3321E-8x^2$ *	97.30
EUA [(µmol m ⁻² s ⁻¹) (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹) ⁻¹]	3.17 a	1.98 b	2.05 b	1.16 c	1.73 b	10.39	-45.30	$y = 3.1194 - 0.0062x + 5.7672E-6x^2$ **	85.26
EiUA [(µmol m ⁻² s ⁻¹) (mmol m ⁻² s ⁻¹) ⁻¹]	46.63 a	30.24 b	31.25 ab	37.81 ab	45.23 ab	15.10	-2.99	$y = 44.8699 - 0.0827x + 0.0001x^2$ **	87.91

Letras iguais não diferem entre si, nas linhas, pelo teste de tukey, a 5% de probabilidade.

3.4 - CONCLUSÃO

As plantas de paricá foram sensíveis as doses aplicadas de cádmio interferindo nas trocas gasosas e no crescimento.

Em relação aos parâmetros fisiológicos esses não suportaram as doses de cádmio aplicadas, alterando a sua produção de energia na forma de ATP e NADPH.

Foram necessários 14 dias para que as doses de cádmio alterassem todas os parâmetros de crescimento e fisiológico. Contudo, a variável eficiência intrínseca do uso de água (EiUA) se mostrou elevada nas condições de estresse mantendo o mínimo de equilíbrio hídrico.

O elemento fitotóxico cádmio concentrou-se principalmente nas raízes, mas houve translocação para parte aérea, sinalizando uma característica fitoextratora.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, R. A., GRATÃO, P. L., MONTEIRO, C. C., CARVALHO, R. F. What is new in the research on cadmium-induced stress in plants? **Food and Energy Security**, Rothamsted, v. 1, n. 2, p.133-140, 2012.
- ALMEIDA, L. G. **Parâmetros de crescimento, bioquímicos e ecofisiológicos em plantas de milho cultivadas em solos multicontaminados com Cd e Zn**. 2015, 83 p. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Lavras/MG.
- BENAVIDES, M. P., GALLEGO, S. M., TOMARO, M. L. Cadmium toxicity in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.17, n.1, p. 21-34, 2005.
- BACELAR, E. A., MOUTINHO-PEREIRA, J. M., GONÇALVES, B. C., FERREIRA, H. F., CORREIA, C. M. Changes in growth, gas exchange, xylem hydraulic properties and water use efficiency of three olive cultivars under contrasting water availability regimes. **Environmental and Experimental Botany**, v.60, n. 2, p. 183- 192, 2007.
- DALCORSO, G., FARINATI, S., MAISTRI, S., FURINI, A. How plants cope with cadmium: Staking all on metabolism and gene expression. **Integrative Plant Biology**, v. 50, n. 10, p. 1268-1280, 2008.
- EKMEKÇIA, Y., TANYOLAÇB, D., AYHANA, B. Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars. **Jounal. Plant Physiology**, v. 165, n. 6, p. 600–611, 2008.
- FORNAZIER, R. F., FERREIRA, R. R., VITÓRIA, A. P., MOLINA, S. M. G., LEA, P. J. Effects of cadmium on antioxidant enzymes activities in sugar cane. **Biologia Plantarum**, v. 45, n. 1, p. 91-97, 2002.
- 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. **Nutrientes Ciclagem em Agroecossistema**, v. 83, n. 2, p. 125-133, 2009.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- FERREIRA, M. M. A. A. S. **Toxidez de cádmio inibe o crescimento e altera a absorção de nutrientes do girassol**. 2013, 45 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas), Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA.
- GRANT, C. A. Influence of Phosphate Fertilizer on Cadmium In **Agricultural Soils and Crops**. *Pedologist*, v. 54, n. 3, p. 143-155, 2010.
- GALLEGO, S. M., LILIANA, B. P., ROBERTO, A. B., CLAUDIA, E. A., MARÍA, F. I. ELIANA, P. R., MYRIAM, S.Z., MARÍA, D.G., MARÍA, P. B. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: insight into regulatory mechanisms. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 83, p. 33-46, 2012.

GUERRA, A. M. N. M., RODRIGUES, F. Á., LIMA, T. C., BERGER, P. G., BARROS, A. F., SILVA, Y. C. R. Capacidade fotossintética de plantas de algodoeiro infectadas por ramulose e supridas com silício. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 1, p. 50-64, 2014.

HASANUZZAMAN, M., NAHAR, K., ALAM, M.M., FUJITA, M. Adverse **Effects of Cadmium on Plants and Possible Mitigation of Cadmium-Induced Phytotoxicity** Capítulo 1 em Cadmium: Characteristics, Sources of Exposure, Health and Environmental Effects. (pp. 1-48). Ed. Mirza Hasanuzzaman & Masayuki Fujita. Nova Science Publishers, Inc. Nova Iorque. EUA.2013.

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

KEILIG, K.; LUDWIG-MÜL, J. Effect of flavonoids on heavy metal tolerance in *Arabidopsis thaliana* seedlings. **Botanical Studies**, Dresden, v. 50, n. 3, p. 311-318, 2009.

LEITA, L., MARCHIOL, L., MARTIN, M., PERESSOTTI, A., DELLE VEDOVE, G., ZERBI, G. Transpiration dynamics in cadmium-treated soybean (*Glycine max* L.) plants. **Journal Agronomy Crop Science**, Berlin, v. 175, n. 3, p.153-156, 1995.

LEFÈVRE, I.; VOGEL-MIKUS, K.; JEROMEL, L.; VAVPETIC, P.; PLANCHON, S.; ARČON, I.; ELTEREN, J.T.V.; LEPOINT, G.; GOBERT, S.; RENAUT, J.; PELICON, P.; LUTTS, S. Differential cadmium and zinc distribution in relation to their physiological impact in the leaves of the accumulating *Zygophyllum fabago* L. **Plant, Cell and Environment**, v. 37, n. 6, p. 1299-1320, 2014.

MA, C. C., GAO, Y. B., GUO, H. Y., WANG, J. L. Photosynthesis, transpiration and water use efficiency of *Caragana microphylla*, *C. intermedia* and *C. korshinskii*. **Photosynthetica**, v. 42, n. 1, p. 65-70, 2004.

MICHALAK, A. Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress. **Polish Journal of Environmental Studies**, Olsztyn, v. 15, n. 4, p. 523-530, 2006.

MARTINS, L. L., REIS, R., MOREIRA, I., PINTO, F., SALES, J., MOURATO, M. **"Antioxidative Response of plants to oxidative stress induced by cadmium"** Capítulo 3, em Cadmium: Characteristics, Sources of Exposure, Health and Environmental Effects. Ed. Mirza Hasanuzzaman & Masayuki Fujita. Nova Science Publishers, Inc. Nova Iorque. EUA. 2013.

MARQUES, M.C., & NASCIMENTO, C.W.A. Analysis of chlorophyll fluorescence spectra for the monitoring of Cd toxicity in a bio-energy crop (*Jatropha curcas*). **Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 127, p. 88-93, 2013.

OK, Y. S., KIM, S. C., KIM, D. K., SKOUSEN, J. G., LEE, J. S., CHEONG, Y. W., KIM, S. J., YANG, J. E. Ameliorants to immobilize Cd in rice paddy soils contaminated by abandoned metal mines in Korea. **Environmental Geochemistry and Health**, Oxford, v. 33, n. 1, p. 23-30, 2011.

PERFUS-BARBEOCH, L.; LEONHARDT, N.; VAVASSEUR, A.; FORESTIER, C. Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. **The Plant Journal**, v. 32, n. 4, p. 539-548, 2002.

PARMAR, SAROJ., STUIVER, C. E. E., POSTHUMUS, F. S. , SHAHBAZ, M. Zinc exposure has differential effects on uptake and metabolism of sulfur and nitrogen in Chinese cabbage. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Tharandt, v. 177, n. 5, p. 748-757, 2014.

QIAN, H., LI, J., PAN-X., JIANG, H., SUN, G., FU, Z. Photoperiod and temperature influence cadmium's effects on photosynthesis-related gene transcription in *Chlorella vulgaris*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, New York, v. 73, n.6, p. 1202-1206, 2010.

REDONDO-GÓMEZ, S., MATEOS-NARANJO, E., ANDRADES-MORENO, L. Accumulation and tolerance characteristics of cadmium in a halophytic Cd-hyperaccumulator, *Arthrocnemum macrostachyum*. **Hazardous Materials**. v. 184, n. 1-3, p. 299-307, 2010.

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.**, v. 409, p. 3098–3105, 2011.

ROYCHOUDHURY, A.; BASU, S., SENGUPTA, D.N. Antioxidants and stress-related metabolites in the seedlings of two indica rice varieties exposed to cadmium chloride toxicity. *Acta Physiol Plant*, v. 34, n. 17, p. 835-847, 2012.

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, n. 6, p. 1135- 1144, 2001.

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, n. 2-3, p. 337– 354, 2002.

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**, v. 7, n. 2, p. 321-334, 2003.

SOUZA, E. P., SILVA, I. F., FERREIRA, L. E. Mecanismos de tolerância a estresses por metais pesados em plantas. *Revista Brasileira. Agrobiência*, Pelotas, v. 17, n. 2-4, p. 167-173, 2011.

SINGH, H. P., MAHAJAN, P., KAUR, S., DAIZY, R. B., KOHLI, R. K. Chromium toxicity and tolerance in plants. **Environmental Chemistry Letters**, Heidelberg, v. 11, n. 3, p.229-254, 2013.

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

TAIZ, L. & ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Porto Alegre: Artemed, 6. ed. 858p, 2017.

VITÓRIA, A. P.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Antioxidant enzymes responses to cadmium in radish tissues. **Phytochemistry**, v. 57, n. 5, p. 710-715, 2001.

ZHANG, G.-B., YI, H.-Y., GONG, J.-M. The Arabidopsis Ethylene/jasmonic acid-NRT signaling module coordinates nitrate reallocation and the trade-off between growth and environmental adaptation. **Plant Cell**, v. 26, n. 10, p. 3984-3998, 2014.

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, n. 1-2, p. 61-75, 2004.

4 - AVALIAÇÃO DO METABOLISMO NITROGENADO E CARBONO EM PLANTAS JOVENS DE PARICÁ (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke). SUBMETIDAS A CONCENTRAÇÕES DE CÁDMIO

RESUMO

Atualmente, os problemas ambientais relacionados à contaminação do solo por metais pesados, recebem atenção mais efetiva, em virtude do potencial tóxico desses elementos, os principais são o alumínio (Al), arsênio (As), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), chumbo (Pb) ou crômio (Cr). O nitrogênio é um componente importante nas construções de células e tecidos de plantas, sendo requerido para síntese de aminoácidos, ácidos nucleicos, proteínas, clorofilas, lipídeos e uma grande variedade de moléculas que contém nitrogênio em sua estrutura. O presente trabalho teve como objetivo verificar o comportamento bioquímico do nitrogênio e carbono em plantas jovens de paricá quando submetidos a aplicação crescente de cádmio. Para isso, foi realizado um experimento inteiramente casualizado com 5 tratamentos (controle, CdCl_2 178 μM ; CdCl_2 356 μM ; CdCl_2 534 μM ; CdCl_2 712 μM), com 7 repetições, totalizando 35 unidades experimentais. As estruturas metabólicas declinaram de forma significativa com as crescentes doses de cádmio. Evidenciando uma sensibilidade dessa espécie ao elemento fitotóxico. A produção energética dessas mudas foram insuficiente para manter os padrões normais do metabolismo, seja em nível foliar ou radicular, assim como, as baixas atividades enzimáticas para incorporação do nitrogênio em macromoléculas. As doses de cádmio se alocaram principalmente em ambientes radiculares, mas houve transporte desse elemento fitotóxico para a parte aérea. Isso evidenciou que, as mudas de paricá se comportaram com uma fitoextratora de cádmio.

Palavras chaves: Bioquímica. Cloreto de Cádmio. Metal Pesado.

ABSTRACT

Currently, the environmental problems related to soil contamination by heavy metals receive more effective attention. Due to the toxic potential of these elements, the main problems are aluminum (Al), arsenic (As), cadmium (Cd), mercury (Hg), lead (Pb) or chromium (Cr). Nitrogen is an important component in the construction of plant cells and tissues and is required for the synthesis of aminoacids, nucleic acids, proteins, chlorophylls, lipids and a wide variety of nitrogen-containing molecules in their structure. The objective of this work was to verify the biochemical behavior of nitrogen and carbon metabolism in young plants of paricá when submitted to increasing cadmium application. For this, a completely randomized experiment was carried out with 5 treatments (control, CdCl₂ 178µM, CdCl₂ 356µM, CdCl₂ 534µM, CdCl₂ 712µM), with 7 replicates, totaling 35 experimental units. Metabolic structures declined significantly with increasing doses of cadmium. Evidence of a sensitivity of this species to the phytotoxic element. The energy production of these seedlings was insufficient to maintain normal norms of metabolism, either at foliar or root level, as well as the low enzymatic activities for incorporation of nitrogen into macromolecules. The cadmium doses were mainly allocated in root environments, but there was transportation of this phytotoxic element to the aerial part. This showed that paricá seedlings behaved as a cadmium phytoextractor.

Keywords: Biochemical; cadmium chloride; Heavy metal.

4.1- INTRODUÇÃO

Conhecido como paricá, o (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke), ocorre em toda região amazônica principalmente em mata primária e secundária de terra firme e várzea alta de regiões do Mato Grosso, Pará, Amazonas e Rondônia, perfazendo fronteiras com a Bolívia, Colômbia, Costa Rica, Equador, Honduras e Peru (REIS; PALUDZYSZYN FILHO, 2011). De acordo com a Abimci (2015) é a espécie florestal nativa mais cultivada no país, gerando emprego e renda através do seu plantio e atraindo também pequenos produtores, com excelentes resultados econômicos se comparado às outras atividades agrícolas tradicionais.

O cádmio é considerado um dos metais pesados com maior fitotoxicidade independente da dose aplicada (DALCORSO et al., 2010; ALLOWAY, 2013), não apresenta função biológica conhecida e pode tornar-se tóxico para plantas quando é absorvido e atinge níveis de 2 a 10 mg kg⁻¹ MS, sendo no entanto, estes valores muito variáveis de acordo com a espécie da planta (WHITE; BROWN, 2010; GALLEGO et al., 2012; CHOPPALA et al., 2014).

O cádmio ocorre naturalmente pelos processos de pedogênese, atividade vulcânica, bem como outras menos relevantes (MARTINS et al., 2013). Por outro lado, as atividades antropogênicas que permitem a sua disponibilização são inúmeras desde a extração como impureza de minérios até ao uso direto em baterias e pilhas Ni-Cd. Mas o que vem chamando a atenção é a aplicação incontrolada de fertilizantes fosfatados, adubos, resíduos de indústrias metalúrgicas e águas residuais não tratadas que podem apresentar concentrações significativas desse metal pesado (AHMAD et al., 2008; CHOPPALA et al., 2014; LEE et al., 2013; OK et al., 2011).

Os metais pesados como o cádmio quando absorvidos pelas plantas se acumulam nos tecidos vegetais e compartimentalizam-se em células de folhas, caule e raízes, dificultando o metabolismo geral da planta, o equilíbrio homeostático e o seu desenvolvimento (HASAN et al., 2009). Os efeitos da presença do cádmio pode provocar alterações no potencial de membrana, perturbando a absorção de água e nutrientes essenciais (Martins *et al.*, 2013), assim como o bloqueio de grupos essenciais de biomoléculas, degradação de lípidos, inibição da atividade enzimática CHOPPALA et al., 2014).

Portanto, em função das disfunções bioquímicas que esse elemento pode causar nos vegetais o presente trabalho teve como objetivo verificar por meio do comportamento metabólico do carbono e nitrogênio os efeitos de doses crescentes de cádmio em plantas jovens de paricá.

4.2- MATERIAL E MÉTODOS

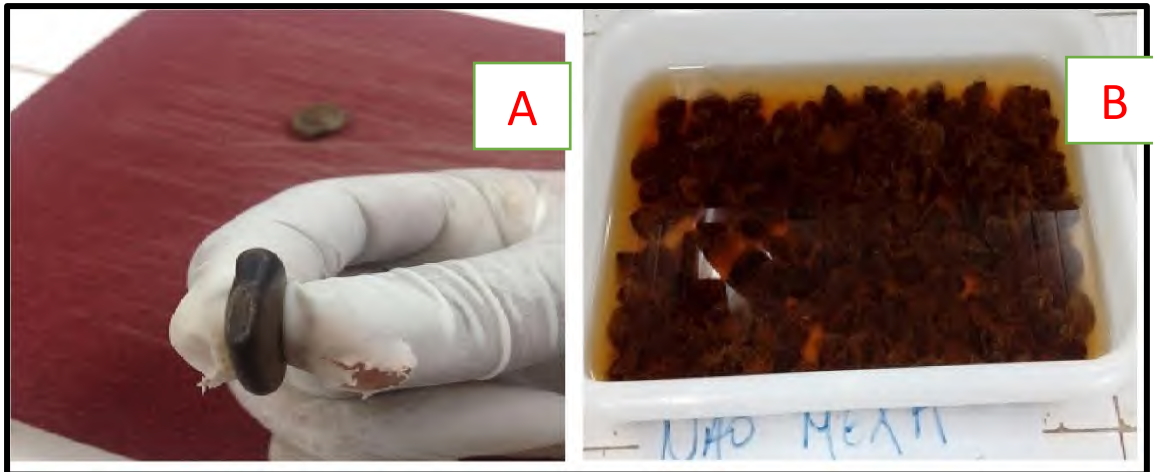
4.2.1- Condição experimental

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação do Instituto de Ciências Agrárias (ICA), pertencente a Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), localizado no município de Belém, PA, com coordenadas geográficas de 01° 27' 31" S, 48° 26' 04.5" O e altitude média de 8 m. No período de dezembro de 2017 a junho 2018. A classificação do clima é Af segundo a Köppen e Geiger com temperatura média de 26,8 °C e umidade relativa do ar de 95%.

4.2.2- Produção de mudas e exposição das plantas às dosagens de cádmio

As sementes de paricá foram oriundas da Associação das Indústrias Exportadoras de Madeira do Estado do Pará (AIMEX) em Benevides – PA. O processo para produção de mudas de paricá procedeu-se com escarificação das sementes com lixa nº 80 (A), embebição em água fria por um período de 24h para facilitar a quebra de dormência (B) (Figura 3). Após esse período as mesmas foram semeadas em vasos tipo Leonard com capacidade de 4,6 L adaptados com garrafas pet (Figura 4), contendo areia lavada e esterelizada, os vasos foram envolvidos com papel alumínio (para minimizar a interferência da radiação solar no crescimento radicular). Foi colocado na superfície de cada vaso, papel e.v.a em forma de círculos, para evitar a proliferação de algas. Após as mudas terem completado 15 dias após o semeio foi aplicada a solução nutritiva de (SARUGE, 1975), para completar seu crescimento antes da aplicação dos tratamentos, onde eram renovadas semanalmente e o pH mantido entre 5,8 a 6,0 (Tabela 3). Transcorridos 60 dias após o semeio foram aplicadas as concentrações de cádmio CdCl_2 178 μM ; CdCl_2 356 μM ; CdCl_2 534 μM ; CdCl_2 712 μM na forma de cloreto de cádmio ($\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) em solução nutritiva.

Figura 3 - Escarificação e embebição das sementes de paricá



Fonte: O Autor

Figura 4 - Vasos adaptados tipo leonard usados no experimento



Fonte: O Autor

Tabela 2 - Composição da solução nutritiva utilizada no experimento.

Composição	Concentração (mM)
KNO₃	5
KH₂PO₄	1
Ca(NO₃)₂.4H₂O	5
Mg(SO₄).7H₂O	2
Fe(EDTA)	1
a) FeSO₄.7H₂O	0,09
b) Na(EDTA)	0.07
MICRONUTRIENTES	
a) H₃BO₃	0,046
b) MnCl₂.4H₂O	0,009
c) CuSO₄.5H₂O	0,003
d) ZnSO₄.7H₂O	0,007
e) Na₂MoO₄.2H₂O	0,001

4.2.3- Coleta e armazenamento do material

Após 15 dias da aplicação do cádmio com sinais de toxidez (clorose, epinastia, senescência foliar) – (Figura 5) foram coletadas para análise bioquímicas, as mudas foram separadas em folha, caule e raiz, os três órgãos foram armazenados em sacos de papéis e levados à estufa de ventilação de ar forçada a 65°C por 48 h. Após a secagem as partes foram moída em moinho tipo Wiley, sendo devidamente armazenado em tubos de falcon. Parte do material seco foi levado para a Museu paraense Emílio Goeldi para análise da concentração de cádmio.

Figura 5 – Sinais de toxidez por cádmio nas mudas de paricá



Fonte: Autor

4.2.4- Variáveis bioquímicas analisadas

As análises bioquímicas foram realizadas no Laboratório de Estudos em Biodiversidades de Plantas Superiores (EBPS), localizado na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Belem, Pará. Os parâmetros avaliados foram: sacarose (VAN HANDEL 1968); carboidratos solúveis totais (DUBOIS et al., 1956); açúcares redutores (RINNER et al., 2012); determinação das concentrações de nitrato (NO_3^-) (CATALDO et al., 1975); atividade da enzima redutase do nitrato (RN) (HAGEMAN; HUCKLESBY, 1971); amônio livre (NH_4^+) (Weatherburn, 1967); aminoácidos solúveis totais (PEOPLES et al., 1989); os teores de proteínas solúveis (BRADFORD, 1976). Prolina (BATES; WALDREN; TEARE 1974) e glicina betaína (GRIEVE E GRATTAN, 1983).

4.2.5- Delineamento experimental e análise estatística

Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), com 5 tratamentos sendo constituídos de plantas controle (sem doses de cádmio) e com doses de Cádmio (CdCl_2 178 μM ; CdCl_2 356 μM ; CdCl_2 534 μM ; CdCl_2 712 μM) com 7 repetições cada (uma planta/vaso) totalizando 35 unidades experimentais.

Os dados obtidos foram submetidos análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$) e as médias foram comparadas pela diferença mínima significativa do teste do Tukey ($p < 0,05$) e foram ajustadas por equações de regressão polinomial $P < 0,01$ ou $0,05$ usando-se o programa Sisvar (FERREIRA, 2011).

4.3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1- Sacarose

A sacarose em condições de estresse abiótico atua como um ajustador osmótico promovendo a preservação energética das plantas aumentando suas concentrações (SIRINGAM et al., 2011). Contudo, as plantas de paricá sob aplicações crescentes de cádmio tiveram as suas concentrações de sacarose diminuídas tanto em folhas como em raízes, tendo nas folhas uma maior perda desse açúcar. O percentual relativo de redução e aumento para as folhas e raízes foram de - 64,48% e - 47,95% respectivamente. Diferenças estatísticas nas folhas ocorreram nos tratamentos T2 (178 μM), T4 (534 μM) e T5 (712 μM) e para as raízes as diferenças

ocorreram T3 (356 μM), T4 (534 μM) e T5 (712 μM), quando comparados com as plantas controle (Tabela 3).

Martins et al. (2016) verificaram que aparentemente as plantas liberam enzimas invertases para dividir a sacarose em frutose e glicose, e esse processo é irreversível, essa clivagem reduz o potencial hídrico dificultando o processo fotossintético e conseqüentemente a produção energética. A sacarose pode ter efeitos de feedback negativo sobre a fotossíntese, reduzindo a quantidade e a atividade da Rubisco (BADR et al., 2011; 2015). Essa resposta está relacionada diretamente as diferentes concentrações de cádmio interferindo negativamente no processo energético das mudas de paricá.

4.3.2- Carboidratos Solúveis Totais

Os resultados apresentados para os carboidratos solúveis totais nas folhas mostraram um crescimento até o T4 (534 μM), caindo no tratamento T5 (712 μM). Isso proporcionou diferenças estatísticas para esses dois tratamentos quando comprado as plantas controle.

O percentual relativo de redução e aumento (PRA) para as folhas foi de 36,7% de aumento. Nas raízes houve decréscimo até o T3 (356 μM), subindo no T4 (534 μM) e voltando a decrescer no T5 (712 μM). Evidenciando diferenças estatísticas nesses três tratamentos quando comparado as plantas controle. O percentual relativo de redução e aumento (PRA) para esse órgão foi de - 92,63%. Mostrando o efeito negativo desse metal pesado nas mudas de paricá., (Tabela 3).

A interferência no metabolismo de carboidratos é uma resposta comum de plantas na presença de diferentes metais pesados (ZHAO et al., 2011; WANG et al., 2012). Algumas enzimas contribuem para o aumento desse composto a exemplo da triose fosfato isomerase e gliceraldeído 3-fosfato desidrogenase, justificando o aumento nas folhas de carboidrato e outras como enolase e fosfoglicomutase apresentaram diminuição de expressão influenciando na baixa concentração de carboidratos justificando as respostas para as raízes. Essa diferença de efeito do cádmio sobre diferentes enzimas de uma mesma via sugere uma plasticidade metabólica do organismo vegetal, regulando diferentemente enzimas de uma mesma via para suprimento energético.

4.3.3- Açúcares redutores

Os açúcares redutores fazem parte dos açúcares não estruturais cujos teores são sensíveis as variações ambientais e injúrias sofridas pelas plantas. São açúcares utilizados para avaliar as respostas das plantas às condições de estresse (BENNETT et al., 2005; SOUZA et al., 2013). Os resultados desse estudo mostraram que o aumento crescente das doses de cádmio aumentava as concentrações de açúcares redutores nas folhas até o tratamento T4 (534 μM), decrescendo no T5 (712 μM). Diferenças estatística somente com o tratamento T4 quando comparado as plantas controle. O percentual relativo de redução e aumento (PRA) foi de 33,25 %. Os resultados observados para as raízes mostraram um comportamento decrescente linear nas concentrações de açúcares redutores. Obtendo um percentual relativo de redução e aumento (PRA) de -35,08% (Tabela 3).

Segundo Guiboileau et al. (2010). A limitação de nitrogênio é um dos fatores que desencadearam o acúmulo de açúcares nas folhas. Isso pode ser comprovado pela baixa concentração de NO_3^- nas folhas (Tabela 1). Outra constatação está no metabolismo primário do carbono dessas plantas que produziram em grande quantidade os principais açúcares redutores que são a glicose e frutose nas folhas, em virtude desses açúcares serem importantes intermediários na rota metabólica da fotossíntese e da respiração celular, enquanto outros são componentes estruturais de ácidos nucleicos, além de constituírem blocos básicos da construção de muitos outros carboidratos, incluindo amido e celulose (SALISBURY; ROSS 1992).

As baixas concentrações de açúcares redutores nas raízes se deve ao efeito inibitório do cádmio no crescimento das raízes de paricá, isso é atribuído provavelmente à redução da mitose, danos no aparelho de Golgi, a síntese reduzida de componentes de parede celular e alterações no metabolismo de açúcares (FERREIRA, 2013). A capacidade de retenção de cádmio nas diferentes partes da planta está relacionada ao complexo sistema que envolve adsorção, quelação e compartimentalização, limitando a translocação de cádmio da raiz para a parte aérea (NOCITO et al., 2011).

4.3.4- Nitrato (NO_3^-)

As concentrações de nitrato nas folhas apresentaram um certo crescimento até o tratamento T4 (534 μM), decrescendo no tratamento T5 (712 μM). isso proporcionou um percentual relativo de redução e aumento (PRA) de 38,22% de crescimento. As diferenças estatísticas ocorreram nos T3, T4 E T5, quando comparado as plantas controle. Para as raízes

houve um crescimento até o tratamento T2 (178 μM), a partir desse ponto houve um decréscimo dessa variável. O percentual relativo de redução e aumento (PRA) foi de - 17,97% de decréscimo. Havendo diferenças estatísticas apenas com o tratamento T5, quando comparado as plantas controle (Tabela 3).

Esse comportamento é considerado normal em virtude do nitrato (NO_3^-) ser uma das principais formas de entrada de nitrogênio nas plantas, uma vez assimilado pelas raízes pode ser reduzido no citosol das mesmas e armazenado no vacúolo. Isso justifica as maiores concentrações nesse órgão. Contudo, esse nitrato (NO_3^-) pode ser transportado via xilema para as folhas onde será reduzido no citosol e podendo ser armazenado nesse compartimento (BALOTF et al., 2012). Em situação de excesso de metais pesados, caso observado nesse estudo, plantas modificam o fluxo normal de NO_3^- de modo a estocar esse íon em órgãos fortemente afetado pelo metal, caso das raízes quando comparado as folhas (LI et al., 2010, ZHANG et al., 2014).

4.3.5- Enzima redutase do nitrato

Observou-se que a atividade enzimática da redutase do nitrato (RN) nas folhas reduziu consideravelmente a medida que as concentrações de cádmio aumentavam, apresentando diferenças estatísticas entre os tratamentos com metais e as plantas controle. O percentual relativo de redução e aumento (PRA) foi de - 96,2% de decréscimo. Nas raízes os resultados mostraram um aumento expressivo dessa enzima até o tratamento T3 (356 μM), decresceu no tratamento T4 (534 μM) e voltando a subir no T5 (712 μM). Apresentando diferenças estatísticas com as plantas controle. O percentual relativo de redução e aumento (PRA) foi de 271,14% de crescimento (Tabela 3).

Sob estresses abióticos, a enzima RN pode atuar como importante biomarcador da tolerância de plantas a metais fitotóxicos uma vez que sob estresse por cádmio os vegetais tendem a diminuir a produção desta enzima, principalmente, pela baixa absorção de nitrogênio, fato observado nas folhas de paricá (SINGH et al., 2015). Outro fato que explica essas respostas dessa baixa atividade enzimática, está na dependência dessa enzima nitrato redutase (RN) da energia proveniente da fotossíntese [nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato oxidase [NAD(P)H] que pode ter sido afetada pelas altas concentrações de cádmio, desta forma, o bom status fisiológico da planta repercute no aumento da atividade da enzima (MARSCHNER, 2012).

4.3.6- Concentrações de Amônio Livre

As concentrações de amônio livre nas folhas reduziram seus valores para os tratamentos T3 (356 μM); T4 (534 μM) e T5 (712 μM), apresentando diferenças estatísticas quando comparado as plantas controle, contudo, o tratamento T2 (178 μM) foi o único que obteve um valor acima das plantas controle. O percentual relativo de redução e aumento (PRA) foi de -38,2% para as folhas. Os resultados apresentados para as raízes evidenciavam que a medida que as concentrações de cádmio aumentavam, as concentrações de amônio diminuía. Mesmo com essa queda apresentou maiores valores quando comparado as concentrações das folhas. O percentual relativo de redução e aumento (PRA) foi de -16,77% (Tabela 3).

Essa baixa concentração de amônio nas folhas se deve provavelmente em virtude das baixas concentrações de NO_3^- e da atividade da enzima RN, haja vista, que tanto substrato como enzima participam diretamente das reações catalíticas para produção de nitrito NO_2^- pela enzima redutase do nitrito (RNi) e posteriormente a amônio (NH_4^+) (MARSCHNER, 2012).

Essa diferença positiva de concentração de amônio nas raízes quando comparado as folhas, se deve a ação do cádmio que provavelmente pode estar relacionada com a ação da enzima glutamina sintetase (GS) que ocorre como uma isoforma isolada em plastídios (GS2) e isoformas localizadas no citosol (GS1) (SWARBRECK et al., 2011; THOMSEN et al., 2014).

A GS1 citossólica é muito importante em raízes, principalmente na assimilação primária de amônio (NH_4^+), e também para reassimilação e reciclagem do amônio (NH_4^+) que é gerado durante a degradação da proteína em folhas ou em processos catabólicos. Enquanto que o papel principal atribuído da GS2 está na reassimilação do amônio (NH_4^+) oriunda da fotorespiração nos cloroplastos e assimilação do amônio (NH_4^+) derivada da redução de nitrato (NO_3^-) nos plastídios (THOMSEN et al., 2014).

4.3.7- Aminoácidos solúveis totais

As menores doses de cádmio influenciaram no decréscimo de aminoácidos nas folhas T2 (178 μM) e T3 (356 μM), ocorrendo ao contrário com as maiores doses T4 (534 μM) e T5 (712 μM). O percentual relativo de redução e aumento (PRA) foi de 68,46% de aumento. E diferenças estatísticas ocorreram apenas no tratamento T5 (712 μM), quando comparado as plantas controle. Para as raízes a medida que as doses de cádmio aumentavam as concentrações de aminoácido diminuía. Diferenças estatísticas ocorreram com os tratamentos

T3 (356 μM), T4 (534 μM) e T5 (534 μM) quando comparado as plantas controle. O percentual relativo de redução e aumento (PRA) foi de -64,89% de decréscimo (Tabela 3).

O aumento de aminoácidos nas maiores doses com cádmio nas folhas se deve possivelmente, Segundo Paixão et al. (2014), a um ajuste osmótico, onde ocorre o acúmulo dessa molécula orgânica na parte aérea para assegurar a turgência e conteúdo de água nas células. Esses compostos contribuirão principalmente para a síntese molecular no citosol ou para a produção de energia em vias respiratórias como a glicólise, ciclo de Krebs e das pentoses-fosfato (BEWLEY et al., 2013).

No sistema radicular o efeito do cádmio foi mais agressivo diminuindo de forma considerável a concentração desse soluto, isso se deve a sua alta reatividade com esses aminoácidos, essa reatividade ocorre principalmente em átomos de N presente nesses aminoácidos (CLEMENS, PALMGREN; KRÄMER, 2002). Outra possível resposta se deve as baixas concentrações de nitrato (NO_3^-) nas folhas de paricá, em virtude desse substrato ser porta de entrada de N nas plantas.

4.3.8- Proteínas solúveis Totais

As concentrações de proteínas acumularam-se nas folhas à medida que as concentrações de cádmio aumentavam. Isso levou a uma diferença estatística entre as plantas de maiores concentrações de cádmio T3 (356 μM); T4 (534 μM); T5 (712 μM) quando comparado as plantas controle (Tabela 1). Isso levou a um percentual relativo de redução e aumento (PRA) de 113,16% de crescimento. Para as raízes houve um decréscimo acentuado até o tratamento T4 (534 μM), a partir desse ponto houve um crescimento de proteínas no tratamento T5 (712 μM), diferenças estatísticas ocorreram somente no tratamento T4 (534 μM), quando comprado as plantas controle. O percentual relativo de redução e aumento (PRA) foi de -15,04% (Tabela 3).

De acordo com Mendes et al. (2011) o acúmulo de proteínas de baixa massa molar pode ser usado como fonte de armazenamento de nitrogênio que seriam mobilizados para diminuição do estresse nas plantas, fato observado nas folhas de paricá.

As proteínas desempenham muitas funções dentro dos vegetais, contudo, segundo Bouzon et al., (2012) e Alfadul; Al-Fredan (2013), a ação do cloreto de cádmio pode afetar muitas vias metabólicas, de modo que as proteínas podem sofrer modificações ou sofrer degradações por meio da fitotoxidez desse elemento, devido aos danos oxidativos ou do

aumento na atividade de enzimas proteolíticas, resultando na redução de sua concentração final, fato evidenciado principalmente nas raízes.

4.3.9- Prolina

As concentrações de prolina nas folhas decresceram nos tratamentos T2 (178 μM), T4 (534 μM) e T5 (712 μM), contudo, não houveram diferenças estatísticas. Esse decréscimo representou um percentual relativo de redução e aumento (PRA) de -24,44%. Para as raízes o decréscimo foi até o tratamento T4 (534 μM), contudo, diferenças estatísticas ocorreram nos T3 (356 μM); T4 (534 μM); T5 (712 μM), quando comparado com as plantas controle. O percentual relativo de redução e aumento (PRA) foi de -26,54% decréscimo (Tabela 3).

A prolina é um aminoácido osmorregulador e vem sendo muito estudado por caracterizar tolerância nas plantas quando submetidas a estresse abiótico (ASTRIR, 2015; YAISH, 2015). Contudo, as altas doses de cádmio aplicadas nas mudas de paricá, proporcionaram um decréscimo desse aminoácido em virtude possivelmente da degradação desse soluto compatível pelas enzimas prolina desidrogenase (PRODH) que catalisa a conversão de prolina em P5C que é, então, oxidada a glutamato pela P5C desidrogenase (P5SDH) e a pirrolina-5-carboxilato desidrogenase (P5CDH) (SZABADOS;SAVORE,2010). Essa degradação metabólica por essas duas vias enzimáticas ocorre restritamente nas mitocôndrias e isso pode acarretar na indução de morte celular (CECCHINI; MONTEOLIVA; ALVAREZ, 2011).

4.3.10- Glicina-betaína

Resultados apresentados para a glicina betaína nas folhas de paricá mostraram que a primeira dose de cádmio proporcionou um decréscimo no T2 (178 μM), à medida que as doses de cádmio eram aumentadas houveram um acentuado aumento de glicina nos tratamentos T3 (356 μM); T4 (534 μM); T5 (712 μM). Esse crescimento representou um percentual relativo de redução e aumento (PRA) de 24,47%. Para as raízes as duas primeiras doses de cádmio apresentaram aumentos desse aminoácido chegando a valores acima das controle T2 (178 μM) e T3 (356 μM), decrescendo no T4 (534 μM) e voltando a aumentar as concentrações de glicina no T5 (712 μM). Isso possibilitou diferenças estatísticas com o tratamento T4 (534 μM) quando comparado as plantas controle (Tabela 3).

Composto quaternário de amônio a glicina é abundante nos cloroplastos e participa no ajuste e na proteção das membranas dos tilacoides e, deste modo, ajuda a manter a eficiência fotossintética (CHEN; MURATA, 2011). As baixas concentrações de amônio contribuíram para uma baixa produção de glicina betaina. Para D'SOUZA; DEVARAJ (2010). o acúmulo de glicina-betaína normalmente ocorre nas espécies tolerantes do que em espécies sensíveis. Fato evidenciado para as mudas de paricá que apresentaram sensibilidade nas altas concentrações de cádmio.

Possivelmente justifique esse não acúmulo de glicina, em virtude dos efeitos tóxicos desse elemento nesse órgão ocasionado seu escurecimento, torção e uma progressiva redução do seu crescimento (WÓJCIK; TUKENDORF, 1999).

Tabela 3 – Médias, equações de regressão e percentual de redução e aumento (PRA) dos parâmetros relacionados ao metabolismo do carbono (C) e nitrogênio (N) na parte aérea e radicular das mudas de (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) submetidas à doses crescentes de cádmio, após 14 dias.

Parâmetro	Doses de cádmio (μM)					CV (%)	PRA (%)	Equação de regressão	R ² (%)
	0	178	356	534	712				
Sacarose nas folhas (mg sacarose g ⁻¹ MS)	4.41 a	1.26 b	2.05 ab	1.13 b	1.56 b	0.38	-64.48	$y = 4.0229 - 0.012x + 1.2275E-5x^2$ *	75.88
Sacarose nas raízes (mg sacarose g ⁻¹ MS)	5.27 a	4.26 ab	2.94 bc	2.49 c	2.74 c	27.10	-47.95	$y = 5.3921 - 0.0093x + 7.6617E-6x^2$ **	97.72
Carboidrato solúvel total nas folhas (μmol carboidrato g ⁻¹ MS)	0.79 b	0.96 ab	1.04 ab	1.16 a	1.08 a	17.51	36.78	$y = 0.8512 + 0.0004x$ **	77.48
Carboidrato solúvel total nas raízes (μmol carboidrato g ⁻¹ MS)	0.39 a	0.33 ab	0.14 cd	0.24 bc	0.03 d	36.34	-92.63	$y = 0.3882 - 0.0005x$ **	78.44
Açúcares redutores nas folhas (μmol carboidrato g ⁻¹ MS)	0.75 b	0.86 ab	0.88 ab	1.13 a	1.00 ab	21.91	33.25	$y = 0.7713 + 0.0004x$ **	70.20
NO ₃ ⁻ nas folhas (mmol de NO ₃ ⁻ kg ⁻¹ MS)	0.02 c	0.02c	0.03 b	0.04 a	0.03 b	1.76	38.22	$y = 0.0242 + 1.5989E-5x$ **	76.22
NO ₃ ⁻ nas raízes (mmol de NO ₃ ⁻ kg ⁻¹ MS)	0.06 ab	0.09 a	0.08 ab	0.07 ab	0.05 b	28.80	-17.97	$y = 0.0679 + 0.0001x - 1.9766E-7x^2$ **	76.97
Redutase do nitrato nas folhas (μmoles de NO ₂ ⁻ .g.MF ⁻¹ .h ⁻¹)	0.62 a	0.17 b	0.17 b	0.13 b	0.02 c	24.44	-96.20	$y = 0.6095 - 0.0038x + 9.5935E-6x^2 - 7.6344E-9x^3$	98.82
Redutase do nitrato nas raízes (μmoles de NO ₂ ⁻ .g.MF ⁻¹ .h ⁻¹)	0.74 c	1.92 b	2.76 a	2.61 ab	2.76 a	22.07	271.14	$y = 0.7796 + 0.0075x - 6.8608E-6x^2$ **	96.85
Amônio nas folhas (mmol de NH ₄ ⁺ kg ⁻¹ de MS)	6.08 a	6.30 a	3.04 b	3.09 b	3.76 b	25.48	-38.20	$y = 6.2157 + 0.0053x - 5.4986E-5x^2 + 6.0354E-8x^3$	87.68
Aminoácidos nas folhas (μmol de AA g ⁻¹ MS)	4.47 bc	4.17 c	3.70 c	6.20 ab	7.52 a	22.10	68.46	$y = 4.469 - 0.0054x + 1.401E-5x^2$ **	91.61
Aminoácidos nas raízes (μmol de AA g ⁻¹ MS)	7.22 a	6.08 a	4.11 b	2.54 b	2.53 b	23.76	-64.89	$y = 7.0757 - 0.0072x$ **	93.92
Proteína nas folhas (mg proteína g ⁻¹ MS)	0.32 c	0.47 bc	0.57 ab	0.59 ab	0.68 a	18.96	113.16	$y = 0.3585 + 0.0005x$ **	92.97
Proteína nas raízes (mg proteína g ⁻¹ MS)	0.47 a	0.39 ab	0.29 ab	0.24 b	0.40 ab	32.77	-15.04	$y = 0.4889 - 0.001x + 1.1678E-6x^2$ **	84.73
Prolina nas raízes (μmol . g ⁻¹ . MS)	0.93 a	0.81 ab	0.68 b	0.66 b	0.68 b	17.62	-26.54	$y = 0.8809 - 0.0004x$ **	78.70
Glicina betaína nas raízes (mg de glicina betaína por g MS)	15.60 ab	15.93 ab	18.20 a	13.93 b	14.64 ab	14.76	-6.13	$y = 15.6129 + 0.0071x - 1.3045E-5x^2$ **	37.10

*Letras iguais não diferem entre si, nas linhas, pelo teste de tukey, a 5% de probabilidade.

A análise estatística fatorial das concentrações de cádmio nesses três órgãos analisados, mostraram que na parte aérea considerando dentro de cada tecido folha e caule, estatisticamente não houveram diferenças, independente das doses de cádmio aplicadas. No caso das raízes houve um acúmulo principalmente nas maiores concentrações de cádmio T4 (534 μM) e T5 (712 μM), diferindo estatisticamente com as plantas controle e T2 (178 μM). Quando analisado entre os tecidos vegetais pode-se observar que a partir do T3 (356 μM), houveram diferenças estatísticas, acumulando-se principalmente nas raízes das plantas com maiores concentrações de cádmio (Tabela 4).

As raízes são os primeiros órgãos das plantas a entrarem em contato com o elemento tóxico, logo, são susceptíveis a sofrer os primeiros danos. Evidências científicas mostram os motivos desse elemento se acumular nas raízes de determinados vegetais. Para Gallego et al. (2012). Os metais pesados entram nas células vegetais através de sistemas de transporte envolvidos na absorção de micronutrientes. Porém, a absorção de cádmio ocorre através de carreadores transmembranas envolvidas na absorção de cálcio (Ca^{2+}); ferro (Fe^{+2}); magnésio (Mg^{+2}); cobre (Cu^{+2}); zinco (Zn^{+2}). Em algumas plantas o transporte de cádmio pelo xilema é restrito, ficando retido nas paredes celulares por diferença de cargas iônicas, e por essa razão são geralmente encontradas em maiores concentrações nas raízes.

Os maiores acúmulos de cádmio nas raízes de plantas podem estar relacionados à presença de ácidos orgânicos nos exsudatos das raízes, sendo que possivelmente o referido metal se ligue a estes ácidos limitando sua translocação para a parte aérea (CHANDRA et al. 2010).

A concentração de cádmio nos órgãos das plantas diminuem de raízes fibrosas para raízes de armazenamento, e sucessivamente para caules e finalmente para as folhas (GRANT et al., 1998; MARTINS et al., 2013; GALLEGO et al., 2012), fato observado nesse estudo.

A absorção ocorrerá pela zona apical ou através da superfície específica da raiz, uma vez nesse órgão as vias de entrada são apoplasto, isto é, sem entrar no interior das células, uma fração desse metal é transportada para dentro das células, outra parte continua a ser transportada via apoplasto (PRASAD, 2004).

Portanto, diferenças na estrutura e organização dos tecidos radiculares, assim como no desenvolvimento de barreiras apoplásticas, são comuns entre espécies tolerantes ou sensíveis a esses poluentes (VACULÍK et al., 2012). No caso do cádmio, a capacidade de transporte interno para este elemento, varia consideravelmente entre as espécies (CHOPRA e PATHAK, 2012).

Tabela 4 – Valores médios das concentrações de cádmio nos três órgãos das plantas de (*Schizolobium Amazonicum* Huber ex Ducke).

Doses de cádmio na solução nutritiva (μM)	Teor de cádmio no tecido vegetal (mg kg^{-1})		
	Folhas	Caule	Raízes
0	0.00 (0.00) Aa	0.00 (0.00) Aa	0.00 (0.00) Ad
178	28.66 (7.37) Aa	51.03 (4.69) Aa	1117.76 (104.36) Acd
356	19.91 (4.97) Ba	48.56 (5.19) Ba	2564.30 (373.60) Abc
534	23.91 (8.37) Ba	55.33 (0.89) Ba	3211.21 (203.15) Aab
712	27.66 (5.54) Ba	51.80 (12.64) Ba	5017.80 (36.78) Aa

Letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si e letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si, pelo teste de tukey, a 5% de probabilidade.

4.4- CONCLUSÃO

Os osmólitos compatíveis nas folhas não apresentaram significância, já para as raízes apenas a prolina apresentou diferença significativa, contudo, decresceram quando as concentrações de cádmio eram aumentadas, podendo-se concluir que não houve características de tolerância.

A produção energética em termos de carboidratos foi limitada principalmente nas raízes em virtude das altas concentrações de cádmio, nas folhas houve crescimento da produção dos açúcares redutores e carboidratos solúveis totais não interferindo diretamente nos processos de assimilação de carbono e nitrogênio;

A principal enzima metabólica na rota da incorporação do nitrogênio a redutase do nitrato (RN) foi afetada pelas doses de cádmio, principalmente nas folhas. Para as raízes houveram uma crescente atividade dessa enzima, mas não representou produção em macromoléculas como os aminoácidos;

Os resultados apresentados evidenciaram que o cádmio foi transportado para parte aérea, contudo, concentrou-se principalmente no sistema radicular caracterizando-se como uma espécie fitoextratora.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, P.; SARWAT, M.; SHARMA, S. Reactive oxygen species, antioxidants and signaling in plants. Review Article. **Plant Biology**. v. 51, n.3, 167-173, 2008.
- ALFADUL, S. M. S.; AL-FREDAN, M. A. A. Effects of Cs, Cu, Pb, and Zn combinations on *Phragmites australis* metabolism, metal accumulation and distribution. Arabian **Journal for Science and Engineering**, Dhahran, v. 38, n. 1, p. 11-19, 2013.
- ALLOWAY, B. J. **Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soil and their bioavailability**. Springer, New York, 2013.
- ALVES, N.N.A.; ALBUQUERQUE, J.H., OLIVEIRA, F.A., CAVALCANTE, L.F., SOUZA, C.C. Manejo da água disponível no solo e adubação fosfatada: efeito sobre a cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**; v.6, p.247-50. 2000.
- ARAGÃO, R. M.; DA SILVA, J. S.; DE LIMA, C. S.; GOMES, J. A. Salinidade modula negativamente a absorção e assimilação de NO. **Revista Ciência Agrônômica**, v.42, n.2, p.382-389, 2011.
- ASHRAF, M.; AKRAM, N.A.; ALQURAINY, F.; FOOLAD, M.R. Drought tolerance: roles of organic osmolytes, growth regulators, and mineral nutrients. **Advances in Agronomy**, v.111, p.249-296, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **Compensados de paricá: Conceito e características de uma nova alternativa**. Curitiba, 2015. 8 p. Disponível em: <<http://www.abimci.com.br/wp-content/uploads/2015/12/parica-para-site.pdf>>. Acesso em: 21 dez. 2018.
- BADR, A.; ANGERS, P.; DESJARDINS, Y. Comprehensive analysis of in vitro to ex vitro transition of tissue cultured potato plantlets grown with or without sucrose using metabolic profiling technique. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 122, p. 491-508, 2015.
- BADR, A.; ANGERS, P.; DESJARDINS, Y. Metabolic profiling of photoautotrophic and photomixotrophic potato plantlets (*Solanum tuberosum*) provides new insights into acclimatization. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 107, p.13-24, 2011.
- BAKER, A. J. M. Metal tolerance. **New Phytologist**, Cambridge, v. 106, n. 1, p. 93-111, 1987.
- BALOTF, S.; NIAZI, A.; KAVOOSI, G.; RAMEZANI, A. Differential expression of nitrate reductase in response to potassium and sodium nitrate: real-time PCR analysis. **Australian Journal of Crop Science**, v. 6, p. 130 - 134, 2012.
- BATES, L. S., WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for waterstress studies. Short communication. **Plant and Soil**. V. 39, p.205-207, 1973.

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

BOUZON, Z.L; FERREIRA, E.C; SANTOS, R; SCHERNER, F; HORTA, P.A; MARASCHIN, M; SCHMIDT, E.C. Influences of cadmium on fine structure and metabolism of *Hypnea musciformis* (Rhodophyta, Gigartinales) cultivated in vitro. **Annals of Botany**, v. 29, p. 229 - 238, 2012.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Anal. Biochem.** v. 72, p.248-254,1976.

CAMPBELL, W.H. structure and function of eukaryotic NAD(P)H: Nitrate reductase. **Cell. Mol. Biol.** v.50, p.277-303, 2001.

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

CHANDRA, R. P.; ABDUSSALAM A.K.; SALIM, N.; JOS, P. Distribution of bioaccumulated Cd and Cr in two Vigna species and the associated histological variations. **Journal of Stress Physiology & Biochemistry**, India, Vol. 6 n. 1, p. 4-12, 2010.

CHEN, T. H. H.; MURATA, N. Enhancement of tolerance of abiotic stress by metabolic engineering of betaines and other compatible solutes. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 5, p. 250-257, 2002.

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

CHOPPALA, G.; SAIFULLAH; BOLAN, N.; BIBI, S.; IQBAL, M.; RENGEL, Z.; KUNHIKRISHNAN, A.; ASHWATH, N.; OK, Y.S. Cellular mechanisms in higher plants governing tolerance to cadmium toxicity. **Critical Reviews in Plant Sciences**. v. 33, n. 5, p. 374-391, 2014.

CHOPRA, A.K.; PATHAK, C. Bioaccumulation and Translocation Efficiency of Heavy Metals in Vegetables Grown on Long-Term Wastewater Irrigated Soil Near Bindal River, Dehradun. **Agricultural Research**, v.1, p.157-164, 2012.

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

DALCORO, G.; FARINATI, S.; FURINI, A. Regulatory networks of cadmium stress in plants. Review Article. **Plant Signaling & Behavior**. V. 5, n. 6, p. 663- 667, 2010.

E-CENTRO. CENTRO DE ARTIGOS. Fontes de níquel na sua dieta. 2012. Disponível em: <http://centrodeartigos.com/dieta/artigo-10795.html>. Acesso: 23/01/2018.

FERREIRA, D. F. Sisvar: um sistema computacional de análise estatística. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FERREIRA, MIRIÃ MARIA ALMEIDA DE ABREU SILVA. **Toxidez de cádmio inibe o crescimento e altera a absorção de nutrientes do girassol**. 45 f. Dissertação (Mestrado em ciências ambientais e biológicas). Universidade federal do recôncavo baiano. 2013.

FLAGELLA, Z.; GIULIANI, M. M.; ROTUNNO, T.; DI CATERINA, R.; AND DE CARO, A. Effect of saline water on oil yield and quality of a high oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrid. **European Journal of Agronomy**, v.21, p.267-272, 2004.

GALLEGO, S. M.; PENA, L. B.; BARCIA, R. A.; AZPILICUETA, C. E.; IANNONE, M. F.; ROSALES, E. P.; ZAWOZNIK, M. S.; GROPPAA, M. D.; BENAVIDES, M. P. Review: Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory. **Environmental and Experimental Botany**, v. 83 p. 33– 46, 2012.

GILL, S. S.; KHAN, N. A.; TUTEJA, N. Cadmium at high dose perturbs growth, photosynthesis and nitrogen metabolism while at low dose it up regulates sulfur assimilation and antioxidant machinery in garden cress (*Lepidium sativum* L.). **Plant Science**, v. 182, p. 112–120, 2012.

GOMES, P. C.; FONTES, M. P. F.; DA COSTA, L. M.; MENDONCA, E. de S. Extração fracionada de metais pesados em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, p. 543-551, 1998.

GRANT, C.A.; BUCKLEY, W.T.; BAILEY, L.D. E SELLES, F. - Cadmium accumulation in crops. **Canadian Journal of Plant Science**, vol. 78, n. 1, p. 1-17, 1998.

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

GUIBOILEAU, A.; SORMANI, R.; MEYER, C.; MASCLAUX-DAUBRESSE, C. Senescence and death of plant organs: Nutrient recycling and developmental regulation. **Comptes Rendus Biologies**, v. 333, n. 4, p. 382-391, 2010.

GUIMARÃES M. A.; Guimarães, A.; Santana, T. A.; Silva, E. V. Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 1, n. 3, p. 58-68, 2008.

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

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

HASAN, S. A.; FARIDUDDIN, Q.; ALI, B.; AHMAD U. Cadmium: toxicity and tolerance in plants. **Journal of Environmental Biology**, Lucknow, v. 30, n. 2, p. 165-174, 2009.

HAYAT, S., HAYAT, Q., ALYEMENI, M.N., WANI, A.S., PICHTEL, J., AHMAD, A., Role of proline under changing environments: a review. **Plant Signal. Behav.** v. 7, p. 1456–1466, 2012.

HERNANDEZ, L. E.; CARPENA-RUIZ, R.; GARATE, A. Alterations in the mineral nutrition of pea seedlings exposed to cadmium. **Journal Plant Nutritional**, New York, n. 19, p.1581-1598, 1996.

KOVÁČIK, J., HEDBAVNY, J. Ammonium ions affect metal toxicity in chamomile plants. **South African Journal of Botany**. 94, p. 204–209, 2014.

LABORSOLO. Micronutrientes: conhecendo o níquel. 2013. Disponível em: <http://www.laborsolo.com.br/site/dris/micronutrientes-conhecendo-o-niquel/>. Acesso: 23/01/2018.

LEA, P. J.; MIFLIN, B. J. Alternative route for nitrogen assimilation in higher plants. **Nature**, London, v. 251, p. 614–516, 1974.

LEE, S.S.; LIM, J.E.; EL-AZEEM, S. A.; CHOI, B.; OH, S. E.; LUA, D. H.; OK, Y. S. Heavy metal immobilization in soil near abandoned mines using eggshell waste and rapeseed residue. **Environmental Science and Pollution Research**, London, v. 20, n. 3, p. 1719-1726, 2013.

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

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

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

MARTINS, J.P.R.; MARTINS, A.D.; PIRES, M.F.; BRAGA, R.A.J.; REIS, R.O.; DIAS, G.M.G.; PASQUAL, M. Anatomical and physiological responses of *Billbergia zebrina* (Bromeliaceae) to copper excess in a controlled 53 microenvironment. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 126, p. 43-57, 2016.

MARTINS, L.L.; REIS, R.; MOREIRA, I.; PINTO, F.; SALES, J.; MOURATO, M. “**Antioxidative Response of plants to oxidative stress induced by cadmium**” Capítulo 3, em *Cadmium: Characteristics, Sources of Exposure, Health and Environmental Effects*. Ed. Mirza Hasanuzzaman & Masayuki Fujita. Nova Science Publishers, Inc. Nova Iorque. EUA. (2013).

MELO, L. E. de L. **Caracterização do câmbio e do lenho de árvores de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby de plantação em clareira da Amazônia**. 2017. 111f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras Minas Gerais, 2017.

MENDES, B. S. S.; WILLADINO, L.; CUNHA, P. C.; FILHO, R. A. O.; CAMARA, T. R. **Mecanismo fisiológicos e bioquímicos do abacaxi ornamental sob estresse salino**. Revista Caatinga, Mossoró, v. 24, n. 3, p.71-77, set. 2011. Disponível em: Acesso em: 03 dez. 2018.

MILNER, M.J. E KOCHIAN, L.V. Investigating heavy-metal hyperaccumulation using *Thlaspi caerulescens* as a model system. **Annals of Botany**, vol. 102, n. 1, p. 3-13. 2008.

MOKHELE, B., ZHAN, X., YANG, G. e ZHANG, X. Review: Nitrogen assimilation in crop plants and its affecting factors. **Canadian Journal of Plant Science**, v.92, n.3, p.399-405. 2012.

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, 1989.

NOCITO, F.F; LANCILLI, C; DENDENA, B; LUCCHINI, B & SACCHI, G. 2011. Cadmium retention in rice roots is influenced by cadmium availability chelation and translocation. **Plant, Cell and Environment**, v. 34, p. 994-1008.

PAIXÃO, C.L.; JESUS, D.S.; NETO, A.D.A.; Caracterização fisiológicas e bioquímicas de genótipos de girassol com tolerâncias diferenciada ao estresse hídrico. Enciclopédia Biosfera, **Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v.10, n.19, p. 2011, 2014.

PAULOSE, B., CHHIKARA, S., COOMEY, J., JUNG, H. IL, VATAMANIUK, O., DHANKHER, O.P. A γ -glutamyl cyclotransferase protects arabidopsis plants from heavy metal toxicity by recycling glutamate to maintain glutathione homeostasis. **Plant Cell**. v. 25, p. 4580–4595. 2013.

PEOPLES, M.B; FAIZAH, A.W; REAKASEM, B.E; HERRIDGE, D.F. **Methods for evaluating nitrogen fixation by nodulated legumes in the field**. Australian. Centre for International Agricultural Research Canberra. 76p.1989.

RASCIO, N.; NAVARI-IZZO, F. Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? and what makes them so interesting? **Plant Science**, Shannon, v. 180, n. 2, p. 169-181, 2011.

REIS, C.A.F.; PALUDZYSZYN FILHO, E. **Estado da arte de plantios com espécies florestais de interesse para o Mato Grosso**. Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 63 p. (Documentos, 215).

RHODES, D.; HANSON, A.D. Quaternary ammonium and tertiary sulfonium compounds in higher plants. **Annual Review in Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.44, p. 357-384, 1993.

SALISBURY FB E ROSS CW. 1992. Plant physiology. California: Wadsworth, Inc. 682p.

SEREGIN, I. V.; SHPIGUN, L. K.; IVANOV, V. B. Distribution and toxic effects of cadmium and lead on maize roots. **Russian Journal Plant Physiology**, v.51, p. 525-533, 2004.

SILVA, E.N.; FERREIRA-SILVA, S.L.; VIÉGAS, R.A.; SILVEIRA, J.A.G. The role of organic and inorganic solutes in the osmotic adjustment of drought-stressed *Jatropha curcas* plants. **Environmental and Experimental Botany**, v.69, p.279-285, 2010.

SILVA, P.C.C.; COUTO, J.L.; SANTOS, A.R. Absorção dos íons amônio e nitrato e seus efeitos no desenvolvimento do girassol em solução nutritiva. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, João Pessoa, v.10, n.2, p.97-104, 2010.

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

SINGH, S; NAFEES, A.K; RAHAT, N; NASER, A.A. Photosynthetic Traits and activities of antioxidant enzymes in blackgram (*Vignamungo*L. Hepper) under cadmium stress. **Am. J. Plant Physiol.**, v. 3, n. 1, p. 25-32, 2008.

SIRINGAM, K., JUNTAWONG, N., CHA-UM, S., KIRDMANEE, C. Salt stress induced ion accumulation, ionhomeostasis, membrane injury and sugar contents insaltsensitive rice (*Oryza sativa* L. spp. indica) rootsunder isoosmotic conditions. *African Journal of Biotechnology*, **Bowie**, v. 10, p. 1340– 1346, 2011.

SOUZA, E. R.; RIBEIRO, V. G.; DANTAS, B. F.; FILHO, J. M. P. L. Variação de carboidratos em folhas da videira ‘Itália’ submetida a diferentes de níveis de desfolhas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 8, n. 4, p. 535-539, 2013. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/96541/1/Barbara.pdf>>. Acesso em: 02 ago. 2018.

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

SZÁBADOS, L.; KOVACS, H.; ZILBERSTEIN, A.; BOUCHEREAU, A. Plants in extreme environments: importance of protective compounds in stress tolerance. TURKAN, I (Ed.). *Plant responses to drought and salinity stress: developments in a postgenomic Era*. London: Elsevier, **Advances in botanical research**. v. 57, p.105-150, 2011.

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

TROVATO, M.; MATTIOLI, R.; COSTANTINO, P. Multiple roles of proline in plant stress tolerance and development. **Rendiconti Lincei**, v.19, p.325-346, 2008.

VACULÍK, M., KONLECHNER, C., LANGER, I., CLASSIFICAÇÃO, W., PUSCHENREITER, M., LUX, A., HAUSER, M. T. Root anatomy and element distribution vary between two *Salix caprea* isolates with different Cd accumulation capacities. **Environmental Pollution**, Barking, v. 163, n. 1, p. 117-126, 2012.

VERBRUGGEN, N.; HERMANS, C. Proline accumulation in plants: a review. *Amino Acids*, v.35, p.753-759, 2008.

WANG, C., ZHANG, S.H., WANG, P.F., LI, W., LU, J., Effects of ammonium on the antioxidative response in *Hydrilla verticillata* (L.f.) royle plants. **Ecotoxicol. Environ. Saf.** v. 73, p. 189–195, 2010.

WANG, Y.; HU, H.; ZHU, L.Y.; LI, X.X. Response to nickel in the proteome of the metal accumulator plant *Brassica juncea*. *Journal of Plant Interactions*. v. 7, p. 230-237, 2012.

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

WEBER, M.B., SCHAT, H., MAAREL, W.M.T.B.-V.D. The effect of copper toxicity on the contents of nitrogen compounds in *Silene vulgaris* (Moench) Garcke. **Plant Soil**. 133, 101–109, 1991.

WHITE, P.J.; BROWN, P.H. Plant nutrition for sustainable development and global health. **Annals of Botany**, Oxford, v. 105, p. 1073–1080, 2010.

WICKERT, E., MARCONDESII, J., LEMOS, M. V. e LEMOS, E. G. M. Nitrogen assimilation in Citrus based on Citest data mining. **Genetics and Molecular Biology**, v.30, n.3, p.810-818. 2007.

WÓJCIK, M.; TUKENDORF, A. Cd-tolerance of maize, rye and wheat seedlings. **Acta Physiologiae Plantarum**, Kraków, v. 21, p. 99–107, 1999.

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

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