

**UniRV - UNIVERSIDADE DE RIO VERDE**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**TOXICIDADE DE CÁDMIO NA CULTURA DA SOJA**

**RAFAELLA OLIVEIRA WILLINGHOFER**

*Magister Scientiae*

**RIO VERDE**  
**GOIÁS - BRASIL**

**2020**

**RAFAELLA OLIVEIRA WILLINGHOFER**

**TOXICIDADE DE CÁDMIO NA CULTURA DA SOJA**

**Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae***

**RIO VERDE  
GOIÁS - BRASIL  
2020**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação-- (CIP)

Willinghofer, Rafaella Oliveira

Toxicidade de cádmio na cultura da soja / Rafaella Oliveira Willinghofer. — 2020.  
80f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão  
Co-orientador: Prof. Dr. Lucas Anjos de Souza

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) — Universidade de Rio Verde - UniRV, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Faculdade de Agronomia, 2020.

Inclui índice de tabelas e figuras.

1. Elementos traço. 2. Fixação biológica do nitrogênio. 3. Fluorescência I. Cantão, Veridiana Cardozo Gonçalves. II. Souza, Lucas Anjos

**RAFAELLA OLIVEIRA WILLINGHOFER**

**TOXICIDADE DE CÁDMIO NA CULTURA DA SOJA**

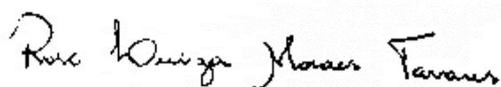
Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

APROVAÇÃO: 04 de agosto de 2020



---

Prof. Dr. Lucas Anjos de Souza  
Membro – Polo de Inovação em Bioenergia e Grãos, IF Goiano - Rio Verde



---

Profa. Dra. Rose Luiza Moraes Tavares  
Membro – FA/UniRV



---

Prof. Dr. Márcio Rosa  
Membro – FA/UniRV



---

Profa. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão  
Presidente da Banca Examinadora  
Membro – FA/UniRV

*Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos que estiveram sempre comigo, me apoiando nos momentos difíceis dessa caminhada de sucesso.*

*Dedico em especial a Willy Willinghofer, meu pai, meu grande exemplo de perseverança nos estudos, que sempre me apoiou, incentivou e caminhou comigo para chegarmos até aqui.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me manter firme na caminhada, sempre me abençoando;

À Universidade de Rio Verde e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pela aceitação no curso;

À minha orientadora Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão, pela grande amizade, apoio e compreensão;

Ao meu coorientador Lucas Anjos de Souza, pelos auxílios prestados;

Ao Departamento de Ciência do solo da Universidade Federal de Lavras - UFLA;

Aos colegas da graduação e da Pós-Graduação que sempre me auxiliaram quando necessário, e ao Veri's Team, em especial ao Engenheiro Agrônomo Ederson Serpa Braga, e à acadêmica do curso de agronomia Emanuela Maria do Carmo Arantes;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás – FAPEG, pela concessão de bolsa de estudos;

Ao meu pai, Willy Willinghofer, pela perseverança e incentivo todos os dias;

Ao meu esposo, Guilherme da Silva Alves, pelo incentivo constante;

Aos meus tios, Aline de Oliveira Freitas e Cleidimar Graciano dos Santos, que também me acolheram em um momento difícil e me ajudaram a seguir em frente;

A todos que participaram de forma direta e indireta.

*Meu muito obrigada!*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	vii
RESUMO GERAL.....	viii
GENERAL ABSTRACT.....	x
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Soja.....	2
2.2 Elementos traço .....	4
2.3 ETs em seres humanos.....	7
2.4 Cádmio (Cd).....	8
2.5 Cádmio nas plantas.....	9
2.6 Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN).....	9
REFERÊNCIAS.....	11
CAPÍTULO 1: GERMINAÇÃO E BIOMETRIA INICIAL DE CULTIVARES DE SOJA SUBMETIDAS A CÁDMIO.....	18
RESUMO.....	18
ABSTRACT.....	19
1 INTRODUÇÃO.....	20
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
4 CONCLUSÕES.....	37
REFERÊNCIAS.....	38
CAPÍTULO 2: PRESENÇA DE CÁDMIO E SEUS EFEITOS NO CRESCIMENTO E NA FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA a EM SOJA.....	43
RESUMO.....	43
ABSTRACT.....	44
1 INTRODUÇÃO.....	45
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	46
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4 CONCLUSÕES.....	59

REFERÊNCIAS.....	59
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Toxicidade média de doses de Cd em cultivares de ciclos precoce, médio e tardio. A: Testemunha, B: 2,5 $\mu\text{g L}^{-1}$ e 5,0 $\mu\text{g L}^{-1}$ .....	23
FIGURA 2	<i>Toxicidade de Cd em cultivares de ciclo de maturação precoce. A: Testemunha, B: 2,5 <math>\mu\text{g L}^{-1}</math> e 5,0 <math>\mu\text{g L}^{-1}</math>.....</i>	24
FIGURA 3	Toxicidade Cd em cultivares de ciclo de maturação médio. A: Testemunha, B: 2,5 $\mu\text{g L}^{-1}$ e 5,0 $\mu\text{g L}^{-1}$ .....	24
FIGURA 4	Toxicidade Cd em cultivares de ciclo de maturação tardio. A: Testemunha, B: 2,5 $\mu\text{g L}^{-1}$ e 5,0 $\mu\text{g L}^{-1}$ .....	25
FIGURA 5	Médias de alturas de plantas (cm) de onze cultivares de soja, de diferentes ciclos de maturação, em relação a doses de Cd ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Letras maiúsculas comparam todas as cultivares dentro da mesma dose e letras minúsculas comparam cada cultivar isolada nas três doses.....	27
FIGURA 6	Médias de comprimento de raiz (cm) de onze cultivares de soja, de diferentes ciclos de maturação, em relação a doses de Cd ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Letras maiúsculas comparam todas as cultivares dentro da mesma dose e letras minúsculas comparam cada cultivar isolada nas três doses.....	29
FIGURA 7	Médias de massa fresca de parte aérea (MFPA) (g kg) de onze cultivares de soja, de diferentes ciclos de maturação, em relação a doses de Cd ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Letras maiúsculas comparam todas as cultivares dentro da mesma dose e letras minúsculas comparam cada cultivar isolada nas três doses.....	31
FIGURA 8	Médias de massa fresca de raiz (MFR) (g kg) de onze cultivares de soja, de diferentes ciclos de maturação, em relação a doses de Cd ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Letras maiúsculas comparam todas as cultivares dentro da mesma dose e letras minúsculas comparam cada cultivar isolada nas três doses.....	32
FIGURA 9	Médias de massa seca de parte aérea (MSPA) (g kg) de onze cultivares de soja, de diferentes ciclos de maturação, em relação a doses de Cd ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Letras maiúsculas comparam todas as cultivares dentro da mesma dose e letras minúsculas comparam cada cultivar isolada nas três doses..	33

FIGURA 10	Médias de massa seca de raiz (MSR) (g kg) de onze cultivares de soja, de diferentes ciclos de maturação, em relação a doses de Cd ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Letras maiúsculas comparam todas as cultivares dentro da mesma dose e letras minúsculas comparam cada cultivar isolada nas três doses.....	34
FIGURA 11	Análise de componentes principais (PCA) de onze cultivares de soja, com diferentes ciclos de maturação, expostas a doses de Cd (0,0 2,5 e 5,0 $\mu\text{g L}^{-1}$ ).....	35
FIGURA 12	Análise de componentes principais (PCA) das 11 cultivares agrupadas por doses, 0,0 2,5 e 5,0 $\mu\text{g L}^{-1}$ .....	36
FIGURA 13	Vasos Leonard utilizados no experimento.....	47
FIGURA 14	Características biométricas da soja (M7110 – IPRO) submetida a doses de Cd. A: Altura da parte aérea; B: Massa seca da parte aérea; C: Massa seca de raiz; D: Massa seca de nódulos; E: Número de nódulos. * Significativo a 5%; ** Significativo a 1%.....	51
FIGURA 15	Alturas de partes aéreas e comprimentos de raízes de plantas de soja submetidas à doses crescentes de cádmio. A: 0,0 mg $\text{L}^{-1}$ de Cd (testemunha), B: 1 mg $\text{L}^{-1}$ ; C: 2 mg $\text{L}^{-1}$ ; D: 4 mg $\text{L}^{-1}$ ; E: 8 mg $\text{L}^{-1}$ ; F: 16 mg $\text{L}^{-1}$ e primeiro sintoma expresso pela soja exposta ao cádmio.....	52
FIGURA 16	Número de nódulos (NN) de plantas de soja submetidas à doses crescentes de cádmio. A: 0,0 mg $\text{L}^{-1}$ de Cd (testemunha), B: 1 mg $\text{L}^{-1}$ ; C: 2 mg $\text{L}^{-1}$ ; D: 4 mg $\text{L}^{-1}$ ; E: 8 mg $\text{L}^{-1}$ ; F: 16 mg $\text{L}^{-1}$ .....	53
FIGURA 17	Características bioquímicas da soja (M7110 – IPRO) submetida a doses de Cd. A: Clorofila; B: Nitrogênio na raiz; C: Cádmio na parte aérea; F: Cádmio na raiz. * Significativo a 5%; ** Significativo a 1%; ns.....	55
FIGURA 18	Características da análise de fluorescência na soja (M7110 – IPRO) submetida a doses de Cd. A: fluorescência máxima por fluorescência inicial no terço superior; B: tamanho e número de centros de reações no terço superior; C: rendimento quântico fotoquímico primário no terço superior; D: rendimento quântico máximo fotoquímico primário no terço superior. * Significativo a 5%.....	57

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Composição química dos nutrientes presentes na solução nutritiva de Hoagland & Arnon (1950).....	48
TABELA 2	Resumo da análise de variância de plantas de soja submetidas à diferentes doses de Cádmio (0; 1; 2; 4; 8 e 16 mg L <sup>-1</sup> ) em ambiente controlado.....	50

## RESUMO GERAL

WILLINGHOFER, Rafaella Oliveira., Universidade de Rio Verde, agosto de 2020. **Toxicidade de cádmio na cultura da soja.** Orientadora: Prof. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão. Coorientador: Prof. Dr. Lucas Anjos de Souza.

A cultura da soja é a mais cultivada em todo o mundo. A fixação biológica de nitrogênio (FBN) é fundamental para o suprimento do nutriente N para a cultura da soja. Sabe-se que Goiás é referência nacional em produção, tornando o tema de extrema relevância. Os insumos utilizados nas práticas de adubação podem apresentar em sua composição elementos traço (ETs) como cádmio (Cd), em variadas concentrações. O trabalho foi conduzido em duas etapas, no primeiro experimento, o objetivo do estudo foi avaliar a germinação e biometria inicial da cultura da soja submetida à cádmio. O experimento foi conduzido na Universidade de Rio Verde – GO e foi avaliada a toxicidade do Cd em diferentes cultivares de soja. Foram adicionadas doses crescentes às sementes de soja, onde foram avaliados a germinação, altura de plantas (AP), comprimento de raiz (CR), massa fresca de parte aérea e de raiz (MFPA e MFR) e massa seca de parte aérea e de raiz (MSPA e MSR) e Análise de Componentes Principais (PCA). O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 3 x 11 com 3 repetições (3 doses de Cd, 0, 2,5 e 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$  e 11 cultivares). Os resultados obtidos foram submetidos a ANOVA e ao teste de Skott-Knott. Conclui-se que no primeiro experimento a presença do elemento traço Cd afetou a germinação das cultivares de soja, sendo a dose 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$  a que apresentou as maiores influências. Cultivares de ciclo de maturação tardio sofreram efeitos na dose 5  $\mu\text{g L}^{-1}$  de Cd, enquanto nas de ciclo precoce e médio isto ocorreu na dose 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$  do elemento. Em relação a PCA, as cultivares sem exposição ao Cd apresentaram comportamentos semelhantes agrupando-se nas partes positivas dos componentes 1 e 2, variando de 0 a 5 positivo. Na dose de 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$ , não houve agrupamento e, para a dose de 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ , as cultivares apresentaram médio agrupamento. No segundo experimento, intitulado doses de cádmio e seus efeitos no crescimento e na fixação biológica do nitrogênio na soja, foi avaliado a FBN com adição de Cd no sistema. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, com a cultivar M7110 IPRO em vasos Leonard, utilizando-se DIC com 5 repetições. Os tratamentos foram compostos por 6 doses de Cd: 0; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0 e 16,0  $\text{mg L}^{-1}$ . As sementes foram inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium japonicum* indicadas para a cultura. Quando as plantas atingiram o estágio fenológico R1 (florescimento), foram realizadas as avaliações das características: altura de parte aérea (APA), volume de raiz (VR), massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR), massa seca de nódulos (MSN), número de nódulos (NN), índice de clorofila, fluorescência, N total da parte aérea e de raízes, temperatura na parte aérea ( $T^{\circ}\text{C}$ ) e teor de Cd na parte aérea e raízes. Os resultados obtidos foram submetidos a ANOVA e ao teste de Skott-Knott, e regressão a 5% de significância. Conclui-se que, no segundo experimento, o aumento das doses de Cd resultaram em redução das características biométricas avaliadas, caracterizando prejuízos para a soja. Nos parâmetros bioquímicos, os resultados que apresentaram os valores mais expressivos foram o cádmio na parte aérea e nas raízes, o aumento das doses resultou em maiores teores de Cd, tanto em parte aérea como nas raízes. Para os parâmetros de fluorescência, os resultados foram significativos no terço superior da soja: Fm/FO: fluorescência máxima por fluorescência inicial; Fv/FO: tamanho e número de centros de reações; Fm/Fv: rendimento quântico fotoquímico primário; Phi\_PO: rendimento quântico máximo fotoquímico primário. No terço médio, os mesmos parâmetros apresentaram-se não significativos, com menores resultados na maior dose de cádmio

aplicada. Para o N total, a significância deu-se nas raízes, quanto maior a dose menores foram os resultados. Conclui-se ainda que as doses de cádmio afetaram negativamente os parâmetros, massa seca e número de nódulos (MSN e NN), massa seca de parte aérea e de raiz (MSPA e MSR), N total raiz, Teor de cádmio nas partes aéreas e de raiz, Clorofila, altura de parte aérea (APA), Fm/FO, Fv/FO, Fm/Fv e Phi\_PO em terços superiores, e não influenciaram o volume de raiz (VR), N total da parte aérea, temperatura da parte aérea (T°C), Fm/FO, Fv/FO, Fm/Fv e Phi\_PO nos terços médios.

**Palavras-chave:** Elementos traço, Fixação biológica do nitrogênio, fluorescência.

## GENERAL ABSTRACT

WILLINGHOFER, Rafaella Oliveira., University of Rio Verde, August, 2020. **Cadmium toxicity in soybean culture.** Advisor: Prof. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão and Coadviser: Prof. Dr. Lucas Anjos de Souza.

The soybean crop is the most cultivated in the world. Biological nitrogen fixation (BNF) is essential for the supply of nutrient N for soybean crops. It is known that Goiás is a national reference in production, making the topic of extreme relevance. The inputs used in fertilization practices can present trace elements (ETs) such as cadmium (Cd), in varying concentrations. The work was carried out in two stages, in the first experiment, the objective of the study was to evaluate the germination and initial biometry of the soybean crop submitted to cadmium. The experiment was carried out at the University of Rio Verde - GO, the toxicity of Cd in different soybean cultivars was evaluated. Increasing doses were added to soybean seeds, where germination, plant height (AP), root length (CR), fresh shoot and root mass (MSPA and MFR) and dry shoot and shoot weight were evaluated root (MSPA and MSR) and Principal Component Analysis (PCA). The design used was completely randomized (DIC), in a 3 x 11 factorial scheme with 3 replications (3 doses of Cd, 0, 2.5 and 5.0  $\mu\text{g L}^{-1}$  and 11 cultivars). The results obtained were submitted to ANOVA and the Skott-Knott test. It is concluded that in the first experiment the presence of the trace element Cd affected the germination of soybean cultivars, with the dose 2.5 $\mu\text{g L}^{-1}$  being the one that presented the greatest influences. Cultivars of late maturation cycle suffered effects at the dose of 5 $\mu\text{g L}^{-1}$  of Cd, while with those of early and medium cycle, this occurred at the dose of 2.5 $\mu\text{g L}^{-1}$  of the element. Regarding PCA, cultivars without exposure to Cd showed similar behaviors, grouping in the positive parts of components 1 and 2, ranging from 0 to 5 positive. At the dose of 2.5  $\mu\text{g L}^{-1}$ , there was no clustering and, for the dose of 5.0  $\mu\text{g L}^{-1}$ , the cultivars showed medium clustering. In the second experiment, entitled cadmium doses and its effects on growth and biological nitrogen fixation in soybeans, FBN was evaluated with the addition of Cd in the system. The experiment was carried out in a greenhouse, with the cultivar M7110 IPRO in Leonard pots, using DIC with 5 repetitions. The treatments consisted in 6 doses of Cd: 0; 1.0; 2.0; 4.0; 8.0 and 16.0  $\text{mg L}^{-1}$ . The seeds were inoculated with strains of *Bradyrhizobium japonicum* indicated for the culture. When the plants reached the phenological stage R1 (flowering), the evaluations of the characteristics were carried out: height of aerial part (APA), root volume (VR), dry mass of aerial part (MSPA) and dry mass of root (MSR), dry mass of nodules (MSN), number of nodules (NN), chlorophyll index, fluorescence, total N of the aerial part and roots, temperature in the aerial part ( $T^{\circ}\text{C}$ ) and Cd content in the aerial part and roots. The results obtained were submitted to ANOVA and the Skott-Knott test, and regression to 5% of significance. It was concluded that in the second experiment, the increase in Cd doses resulted in a reduction in the biometric characteristics evaluated, characterizing losses for soybeans. In the biochemical parameters, the results that presented the most expressive values were the cadmium in the aerial part and in the roots, the increase of the doses resulted in higher Cd contents both in the aerial part and in the roots. For the fluorescence parameters, the results were significant in the upper third of the soybean:  $F_m / F_0$ : maximum fluorescence by initial fluorescence;  $F_v / F_0$ : size and number of reaction centers;  $F_m / F_v$ : primary photochemical quantum yield;  $\Phi_{PO}$ : maximum primary photochemical yield. In the middle third, the same parameters were not significant, with lower results in the highest applied cadmium dose. For the total N, the significance was given to the roots, the higher the dose, the lower the results. It is also concluded that the doses of cadmium

negatively affected the parameters, dry mass and number of nodules (MSN and NN), dry mass of aerial part and root (MSPA and MSR), total N root, Cadmium content in aerial parts and root, Chlorophyll, shoot height (APA),  $F_m / F_0$ ,  $F_v / F_0$ ,  $F_m / F_v$  and  $\Phi_{PO}$  in upper thirds, and did not influence, root volume (VR), total N of the shoot, temperature of the aerial part ( $T^{\circ}C$ ),  $F_m / F_0$ ,  $F_v / F_0$ ,  $F_m / F_v$  and  $\Phi_{PO}$  in the middle thirds.

**Key words:** Trace elements, Biological nitrogen fixation, fluorescence.

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A soja (*Glycine max* L.) é uma das culturas mais importantes na economia mundial. Seus grãos são ricos em proteínas e aminoácidos, além de serem usados pela indústria, principalmente na fabricação de rações, produção de óleos e biocombustível (CARRÃO-PANIZZI; SILVA, 2012, COSTA NETO; ROSSI, 2000).

Existem várias classificações para o ciclo de cultivares de soja, sendo popularmente chamadas de ciclos precoce, médio e tardio. As cultivares atualmente possuem grandes tecnologias, como resistência a pragas, como lagartas e nematóides, além de plantas daninhas, ofertando ao produtor opções para posicionar a cultivar desejada. É uma planta que possui grande variabilidade genética, desde o seu estágio de emergência até a floração, sendo influenciada pelo ambiente onde foi implantada (EMBRAPA, 2008).

Uma característica essencial de uma boa lavoura é o poder germinativo e o vigor das sementes. Estes determinam o potencial da semente para uma emergência rápida e uniforme, para o desenvolvimento de plântulas, quando colocada em condições de campo. O processo da germinação das sementes consiste em uma sequência que envolve uma constante de eventos metabólicos, formando a plântula. Luz, água e temperatura são alguns dos fatores que afetam a germinação da semente. Para expressar o melhor poder de germinação, esses fatores devem estar em condições adequadas, promovendo um estabelecimento de plântulas uniformes no campo (HÖFS, 2004, CARVALHO; NAKAGAWA, 2000).

Existem inúmeras vantagens de uma semente com alto vigor, entre as principais estão a melhor germinação e o desenvolvimento sob condições desfavoráveis, menor consumo de sementes durante a semeadura, estande uniforme e plantas com maiores raízes e melhor desenvolvimento da parte aérea, além de plantas com maior potencial produtivo. Isso ocorre com maior eficiência, quando se tem um solo corrigido, sem a presença de elementos traço (ETs) potencialmente tóxicos, como o cádmio (Cd), além de patógenos e pragas (CARVALHO; NAKAGAWA, 2000).

A necessidade de se produzir alimentos em quantidades cada vez maiores torna a prática da adubação indispensável. Juntamente com os nutrientes, os fertilizantes, orgânicos e minerais podem apresentar em sua composição o Cd (GONÇALVES JUNIOR; PESSOA, 2002). Tal elemento pode ser prejudicial ao ambiente e à saúde humana, pois se acumula em diversos órgãos e aumentam suas concentrações à medida que avançam na cadeia (OOST et al., 2003).

O uso sucessivo de fertilizantes na agricultura pode aumentar as quantidades de Cd, acarretando em possíveis impactos ao ambiente pela contaminação de águas superficiais e subsuperficiais e a entrada deste elemento na cadeia alimentar humana. Existe uma grande preocupação com relação aos possíveis efeitos que os ETs podem exercer sobre o ambiente, a saúde e a segurança alimentar. Assim, é importante e necessário estudar a dinâmica dos elementos-traço no ambiente quanto à sua biodisponibilidade e acúmulo no sistema solo-planta (SOARES et al., 2005).

Sabe-se que o Cd pode ser letal em pequenas concentrações. A presença no ambiente pode ocasionar problemas no crescimento de plantas além da interferência na fauna (GIMBERT, 2008) e na comunidade microbiana. Nesse contexto, a fixação biológica do nitrogênio (FBN) é fundamental para o suprimento do nitrogênio (N) à cultura da soja (VARGAS et al., 1994), que pode ser seriamente comprometida.

O estado de Goiás, especialmente o sudoeste goiano, é referência nacional na produção de soja, tornando o tema FBN um assunto de extrema relevância (CASTILHO, 2007). Baseado nas informações descritas, observa-se que a soja é um dos grãos mais comercializados e consumidos no mundo e que podem existir problemas durante a sua produção que podem comprometer seu desenvolvimento, interferir na maturação fisiológica, o que dificultará o processo final, a colheita. Sendo assim, como é um tema de grande importância, objetivou-se verificar o efeito do Cd durante o ciclo de desenvolvimento da soja.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Soja**

A cultura da soja esteve esquecida por 70 anos no Brasil. Somente a partir do ano de 1960, que se tornou uma das mais importantes culturas do país, além de se tornar o segundo maior produtor mundial de grãos (SEDIYAMA, 2009; EMBRAPA-SOJA, 2017).

O grão de soja tem várias finalidades, entre elas estão a produção de farelo e óleo, suplementação animal, formulados, dentre outras (ROESSING; MENEGHELO, 2001). Seus grãos se destacam por possuírem elevados teores de proteínas e lipídeos, sendo uma das culturas mais importantes do Brasil (CAVALCANTE, 2010).

A soja é uma leguminosa utilizada para vários fins, como alimentação, ração, biodiesel entre outros, sendo uma das culturas mais importantes no mundo e produzida em grande quantidade. Os três maiores produtores de soja são: Estados Unidos, Brasil e Argentina, que, juntos, correspondem a 82,58% da produção mundial. A safra brasileira 19/20 gerou uma produção estimada em 122,2 milhões de t (CONAB,2020), sendo a região Centro-Oeste uma das maiores produtoras no Brasil. Goiás teve uma produção de 24,580 mil toneladas na safra 19/20, o que destaca a importância desse grão. A soja é um dos grãos mais enriquecidos em proteínas (em torno de 40%) e óleo (20%), sendo considerada a planta mais importante do mundo, na atualidade. No Brasil, a variedade cultivada possui em torno de 19% de óleo e 38% de proteína (SEDIYAMA, 2009).

Fatores ambientais como a umidade, luz e temperatura são de grande influência na produtividade da cultura. Mais ou menos 90% do peso da planta é composto por água, atuando em todos os processos bioquímicos e fisiológicos, além da função de solvente por promover a entrada de gases, minerais e outros solutos na célula, permitindo o seu desenvolvimento (EMBRAPA, 2011).

A planta necessita de água principalmente em dois momentos, que são: na germinação, em que se obtém uma boa uniformidade e no florescimento, ocorrendo o enchimento de grãos, necessitando em média de 7 a 8 mm dia. Se a média durante esse período for menor, a planta pode sofrer alterações fisiológicas, entre elas o enrolamento das folhas e o fechamento estomático, ocorrendo o aborto de folhas, flores e vagens, em consequência resultando na queda de rendimento (EMBRAPA, 2011).

A produção de soja com altas produtividades é dependente do manejo dado ao sistema de produção, onde destaca-se o manejo da fertilidade do solo (FAGERIA et al.,1995, SOUSA e LOBATO, 2004). A calagem, além de reduzir a toxidez por alumínio e elevar os teores de bases, promove aumento na capacidade de troca catiônica, menor fixação de fósforo e estímulo ao desenvolvimento de raízes na camada de incorporação do calcário. Calagem, gessagem e adubação corretiva são as práticas agrônômicas relacionadas à produtividade agrícola nos cerrados (SOUSA; LOBATO, 2004).

Os insumos utilizados nas práticas de calagem e adubação que visam à construção da fertilidade do solo podem apresentar na sua composição elementos-traço (ETs), como cádmio (Cd), nas mais variadas concentrações (CAMPOS et al., 2005).

## 2.2 Elementos traço

O termo ETs tem sido usado para definir metais catiônicos e aniônicos presentes em baixas concentrações (usualmente  $< 0,1 \text{ dag kg}^{-1}$ ) em plantas e solos (PIERZYNSKI et al., 1994; ALLOWAY, 1993; SPARKS, 1995; ADRIANO, 2001; ESSINGTON, 2004).

Os ETs são encontrados naturalmente nos solos, sendo que alguns deles, como cobre (Cu) e cobalto (Co), desempenham importante contribuição na nutrição de animais e plantas, enquanto outros, como cádmio (Cd), chumbo (Pb) e arsênio (As), exercem efeitos prejudiciais sobre vários componentes da biosfera (ALLOWAY, 1995; KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001).

A contaminação dos solos por ETs é um grave problema ambiental, devido à persistência destes elementos no ambiente e às suas toxicidades (REDDY; PRASAD, 1990). A exemplo do Cd, outros ETs não apresentam funções no que se refere ao desenvolvimento das culturas. Os ETs podem ser inseridos nas culturas e afetá-las pela sua entrada na cadeia alimentar (BAKER; BROOKS, 1989). Esses elementos podem expressar seu potencial poluente diretamente nos organismos do solo e às plantas em níveis fitotóxicos (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001; SOARES et al., 2005).

A presença de ETs no sistema está associada a diversos riscos (MELO et al. 1997), pois podem afetar a respiração, reduzir a taxa de fotossíntese das plantas e provocar alterações tanto enzimáticas como metabólicas nas plantas. Os efeitos da toxicidade dos elementos sobre as culturas podem ser diferenciados de acordo com a cultivar a ser trabalhada (DAS et al., 1997; ABREU JUNIOR et al., 2009).

Os ETs, de modo geral, apresentam bioacumulação e biomagnificação na cadeia alimentar. A bioacumulação é o processo através do qual os seres vivos absorvem e retêm substâncias químicas no seu organismo (NOLAN et al., 2003), enquanto a biomagnificação é o aumento da concentração de uma substância nos organismos vivos à medida que aumenta o nível trófico (VIEIRA, 2007).

Na maioria das vezes, os elementos estão presentes nos solos, em concentrações ou formas que não oferecem risco para o ambiente. Porém, nos últimos anos, as ações humanas têm aumentado a concentração de alguns ETs em diversos ecossistemas (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001; GUISSARD, 2006).

Alguns ETs são considerados essenciais do ponto de vista biológico, outros não. Mas, mesmo aqueles essenciais podem, sob condições adversas, provocar impactos negativos a

ecossistemas terrestres e aquáticos, constituindo-se, assim, contaminantes ou poluentes de solo e água (GUILHERME et al., 2005).

Os resíduos contendo esses elementos não devem ser descartados em redes públicas para tratamento em conjunto com o esgoto doméstico. As principais fontes de poluição por ETs são provenientes dos despejos industriais, de lavouras e mineração. Os solos possuem características únicas, pois se apresentam não apenas como um adsorvente para contaminantes, mas, também, como tampões naturais, que promovem o controle e o transporte de elementos químicos e outras substâncias para a atmosfera, hidrosfera e biota (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001).

A adsorção prévia de P ( $1.000 \text{ mg kg}^{-1}$  de P no solo) em amostras de horizontes A e B de Latossolos brasileiros tem se mostrado efetiva no aumento da adsorção e na diminuição da retirada de Pb e Cu no solo; no entanto, menos efetiva no caso do Cd (GUILHERME; ANDERSON, 1998; PIERANGELI et al., 2004).

Segundo BAKER (1987), espécies que conseguem sobreviver e crescer em solos contaminados são relacionadas à capacidade de suportar a toxicidade do elemento contaminante. As concentrações dos ETs diferem nos tecidos das plantas, portanto, grãos possuem menores concentrações do que as partes vegetativas da planta (BERTON, 2000).

Em relação à entrada dos ETs na cadeia alimentar, CHANEY; OLIVER (1996) definem que as plantas se comportam como mecanismo de transferência de contaminantes do solo. As plantas limitam a absorção da maioria dos ETs, enquanto seres humanos e animais correm risco pela presença desses contaminantes no solo.

CHANEY (1980) definiu que é possível dividir em grupos os elementos químicos do conceito “barreira solo-planta”, assim, as categorias se definem:

Grupo 1 – são os elementos que não possuem solubilidade no solo ou nas raízes fibrosas das plantas, de forma que a parte aérea delas não constitui fonte de transferência desses elementos, mesmo quando o solo está altamente contaminado; são eles: titânio (Ti), cromo (Cr), zircônio (Zr), ítrio (Y), prata (Ag) e estanho (Sn);

Grupo 2 – contém os elementos que são absorvidos pelas raízes, mercúrio (Hg) e chumbo (Pb), mas não são translocados para o ápice da planta, nas quantidades suficientes para causar danos na transferência da cadeia alimentar;

Grupo 3 – inclui os elementos zinco (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), Boro (B), manganês (Mn) e aqueles para os quais a planta não consegue limitar a translocação e entrada na cadeia alimentar;

Grupo 4 – conhecidos por causarem toxicidade alimentar, inclui os elementos, selênio (Se) e molibdênio (Mo) e o cádmio (Cd) tóxicos, principalmente, para o arroz irrigado.

Devido aos reflexos de ETs nativos no solo possuem teores totais, a composição química do material de origem não possui grande utilidade em sua determinação, quando se necessita entender a biodisponibilidade e a ciclagem desses elementos (McBRIDE, 1994).

Aplicações de fertilizantes adicionam elementos traço ETs ao solo. Dentre os fertilizantes que adicionam ETs ao solo, destacam-se os fosfatados. Os fosfatos utilizados na agricultura, como os fosfatos naturais e os solúveis, são obtidos a partir das rochas fosfáticas e apresentam concentrações variadas de ETs (McLAUGHLIN; SINGH, 1999).

Os fertilizantes apresentam os ETs em sua composição e, em muitos solos agrícolas, tais elementos podem se acumular em concentrações superiores ao dobro das encontradas em áreas com vegetação nativa, devido ao uso repetitivo e em excesso dos fertilizantes (GIMERO-GARCIA et al. 1996; MARCHIORI JR., 2003).

Nos fertilizantes fosfatados, Cd varia de 0,1 a 170 mg kg<sup>-1</sup> e o Pb em torno de 7 a 225 mg kg<sup>-1</sup> (CHITOLINA et al., 2001, apud GUILHERME et al., 2005). Alguns resíduos orgânicos estudados adicionaram de 0,01 a 0,14 mg kg<sup>-1</sup> de cádmio total no solo (FERREIRA, 2003; BEREZUK; GASPARETTO, 2002).

O conhecimento das quantidades totais e formas disponíveis dos ETs no solo são essenciais no diagnóstico da contaminação do solo, possibilitando, com isso, uma melhor definição das estratégias de gerenciamento de solos contaminados. Mesmo que concentrações totais dos ETs no solo não forneçam informações suficientes, é importante conhecê-las, sendo esse conhecimento fundamental na avaliação da entrada desses elementos traço e, assim, na estimativa dos possíveis efeitos negativos associados à exposição a esses elementos tóxicos (BIONDI, 2010).

Quando em condições de contaminação do solo, processos biológicos importantes para a funcionalidade dos ecossistemas, como mineralização de materiais orgânicos, fixação biológica de N<sub>2</sub> dentre outros, podem ser afetados diretamente pela contaminação por ETs, como Cd (BROOKES, 1995). Segundo Chander e Joergensen (2001), a biomassa microbiana de solos poluídos é menos eficiente na utilização de substratos para a própria síntese de constituintes celulares, assim necessita de mais energia para sua própria manutenção.

Em relação aos efeitos causados nas plantas, uma vez absorvidos, os ETs tendem a acumular-se nas raízes, que são os primeiros órgãos vegetais afetados pela poluição do solo, provocando escurecimento e inibição do crescimento radicular (GONÇALVES et al., 2015). A translocação dos ETs da raiz para parte aérea tem sido estudada em várias espécies. Alface,

espinafre, aipo e repolho são acumuladores de Cd na parte aérea (McLAUGHLIN; SINGH, 1999).

Na parte aérea, os sintomas mais típicos da poluição por elementos-traço são aparecimento de manchas foliares, necrose e morte das folhas (BARCELÓ; POSCHENRIEDER, 1992). Tais disfunções nas plantas afetam a vegetação e reduzem a taxa natural de regeneração das espécies (BRECKLE; KAHLE, 1992).

Em feijão, além dos ETs provocarem redução da massa fresca e área foliar, também foi identificado o deslocamento desses da raiz para a parte aérea, mas o translocamento de Cd para os grãos foi muito pequeno (COBBET et al., 2000). Matsuda et al. (2000) demonstraram em seu estudo que o acúmulo de Cd em raízes de feijão desfavoreceu a fixação biológica do nitrogênio, pois os ETs causaram toxicidade aos rizóbios responsáveis pela fixação do nutriente. Entretanto, ainda não se sabem os efeitos do Cd na cultura da soja.

### **2.3 ETs em seres humanos**

A exposição a ETs pelos humanos ocorre por duas formas: a primeira, por ingestão de solo, água e alimentos contaminados e a segunda, por inalação. Os fumantes são os mais expostos ao cádmio, pois o cigarro pode conter este elemento (GUILHERME; MARCHI, 2007).

O cádmio (Cd) entra na corrente sanguínea por absorção no estômago, logo após a ingestão do alimento ou de água contaminada; ou por absorção nos pulmões, após a inalação. Uma vez absorvido, o Cd é transportado pela corrente sanguínea até o fígado. Pequenas quantidades de Cd passam continuamente do fígado para a corrente sanguínea, para então serem transportadas até os rins. Sabe-se que o Cd é um elemento não essencial aos organismos e pode causar alguns efeitos adversos para a saúde animal e de humanos (JARUP; AKESSON, 2009), como severas irritações no estômago, provocando vômitos e diarreias, além de irritações nos pulmões devido à inalação (UEMURA, 2000).

O acúmulo deste elemento nos ossos pode causar dor e debilidade (UEMURA, 2000) e em testículos pode levar à esterilidade (BLOTTNER et al., 1999). Além de carcinogênico (WAALKES, 2000), o Cd tem se mostrado lesivo ao DNA (HARTWING, 1998).

Outra fonte de contaminação é por meio do cigarro de nicotina (PALLU, 2006). A carga corporal de cádmio no organismo de indivíduos fumantes é o dobro da dos não fumantes, oscilando a média diária de exposição de 2 a 4 µg (correspondente a 20 cigarros por dia) (VILAR, 2006).

Os estudos relacionados à análise de risco para os diferentes ETs nos solos e na água representam um grande avanço à minimização de seus possíveis impactos. Assim, podem-se definir normas de segurança de modo que o risco seja mínimo e a presença de contaminantes no ambiente esteja sempre em níveis mais baixos, que os valores máximos permitidos pelos testes toxicológicos (GUILHERME et al., 2005).

Casos ocorridos e de consequências catastróficas envolvendo a exposição de seres humanos a ETs incluem a intoxicação por Hg (Mercúrio) derivado de resíduos da indústria de cloro-soda, na Baía de Minamata, conhecido como o Mal de Minamata (TAKIZAWA, 2000), e a Doença de Itai Itai, devido à intoxicação pelo Cd vindo de rejeitos de mineração que contaminaram campos de arroz (KASUYA, 2000), todos ocorridos no Japão.

Ainda, como interessante registro histórico, ressaltam-se as recentes investigações acerca da morte de Ludwig Van Beethoven, que estaria relacionada à sua intoxicação por Pb (CLAIBORNE, 2000) e o possível envenenamento de Napoleão Bonaparte por Arsênio (LIN; ALBER; HENKELMANN, 2004).

## 2.4 Cádmio (Cd)

O cádmio (do latim *cadmia*, que significa "calamina") foi descoberto na Alemanha, em 1817, por Friedrich Strohmeyer, observando que algumas amostras de calamina com impurezas mudavam de cor quando aquecidas, o que não ocorria com a calamina pura.

O “novo elemento”, cádmio, foi encontrado como impureza neste composto de zinco (BARREIRA, 2008).

É classificado como elemento traço por estar no grupo de elementos com densidade maior que  $5 \text{ g cm}^{-3}$ . Os ETs são naturalmente encontrados no ambiente em concentrações de poucas partes por milhão (MATTIAZZO-PREZOTTO, 1994).

A concentração média de Cd na crosta terrestre é de aproximadamente  $0,17 \text{ mg kg}^{-1}$  (MATTIAZZO-PREZOTTO, 1994). Dentre os ETs, o Cd é considerado um dos principais contaminantes do ambiente e um dos mais tóxicos (CHEN; KAO, 1995).

O Cd destaca-se entre os ETs, por apresentar maior risco ambiental, com características de toxicidade e ampla distribuição. Possui utilização, na fabricação de baterias de automóveis, plásticos coloridos, pigmento de tintas, entre outros (BAIRD, 2002).

Cerca de 25.000 toneladas por ano de cádmio são liberadas no meio ambiente. Cerca de 50% desse Cd é lançado em rios por meio de intemperismo das rochas e liberado no ar por

meio de incêndios. O restante do cádmio é oriundo de atividades industriais (LENNTECH, 2012).

## 2.5 Cádmio nas plantas

Quando o Cd está presente no solo, é absorvido pelas plantas de duas formas: passiva ou ativa. Logo após ser absorvido pelas raízes, o metal é transportado pelos vasos do xilema, ocasionando a sua movimentação por toda a planta, os íons metálicos são misturados dentro de proteínas ou translocados, através do floema, junto com fotoassimiladores, causando uma série de fitotoxicidades (ALLOWAY, 1995).

Esse metal em plantas ocasiona mudanças fisiológicas, morfológicas e estruturais nos vegetais. Ocorre também a diminuição do crescimento, reduzindo a taxa de fotossíntese e provocando alterações metabólicas. No ciclo de Calvin, ocorrem alterações provocadas por esse metal nos estômatos, além de afetar o transporte de elétrons e também na fosforilação oxidativa, além da síntese de clorofila (DEL RIO, 2004).

Geralmente, o Cd se mantém nas raízes e apenas pequenas quantidades são transportadas para a parte aérea, onde se acumula. Contudo, na parte aérea das plantas, os íons de Cd são translocados para os frutos em desenvolvimento via transporte mediado pelo floema (HART et al., 1998). Ocorre devido aos frutos e as sementes dependerem das folhas, pois são fontes primárias de açúcares. Na germinação, quando sementes são postas a germinar em elevados níveis de Cd, a atividade das  $\alpha$  e  $\beta$  amilases são reduzidas, afetando a respiração, resultando na inibição do crescimento da radícula (SHAW et al., 2004).

## 2.6 Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN)

A fixação biológica do nitrogênio (FBN) é fundamental para o suprimento do macronutriente (nitrogênio) para as leguminosas, principalmente para a cultura da soja. Sabe-se que o estado de Goiás, especialmente o sudoeste goiano, é referência nacional na produção de soja, tornando o tema FBN um assunto de extrema relevância (CASTILHO, 2007).

O processo da FBN ocorre mediante uma relação simbiótica com as bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, que podem ser comparadas como cultivares de soja, por exemplo (HUNGRIA, 2007).

A soja e outras leguminosas se destacam pela propriedade da capacidade de FBN do ar, através da simbiose, com bactérias do gênero *Rhizobium*, exclui a necessidade de adubação

nitrogenada, quando feita a inoculação. Junto com o inóculo, acrescentam-se micronutrientes e fungicidas às sementes, além de enxofre, é necessário se fazer adubações potássicas e fosfatadas (MENEGATTI; BARROS, 2007).

O nitrogênio apresenta interações complexas entre ar, solo, planta e microrganismos. Essas interações dizem respeito à forma com que as plantas absorvem o nitrogênio, que ocorre nas formas de  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_3$  e  $\text{NH}_4^+$ , sendo influenciadas por processos biológicos. Existem perdas deste nutriente do sistema solo pela lixiviação e desnitrificação, que podem ocorrer com a contaminação do ambiente (ZAIED et al., 2003).

A formação de um nódulo estabelece vínculo com as plantas, a bactéria penetra na raiz, até produzir uma estrutura específica, o chamado “nódulo”, que tem função de proteger a bactéria, para que ela realize o processo de fixação biológica de nitrogênio (EMBRAPA, 2007).

A FBN é um processo de transformação do  $\text{N}_2$  na forma inorgânica  $\text{NH}_3$ . A reação de redução do  $\text{N}_2$  a  $\text{NH}_3$  é realizada por microrganismos que contêm a enzima nitrogenase, esses microrganismos são conhecidos como fixadores de  $\text{N}_2$  (BERGAMASCHI, 2006). O nitrogênio é um elemento importante e que compõe 80% da atmosfera na forma gasosa de  $\text{N}_2$ , mas que as plantas não conseguem utilizar.

O N fornecido pelo processo de fixação biológica é menos propenso a lixiviação e volatilização, o processo biológico é uma alternativa barata e sustentável para o fornecimento de N na agricultura (HUERGO, 2006). Estima-se que a contribuição de nitrogênio fixado biologicamente seja de 139 milhões de mg de N  $\text{ano}^{-1}$ , enquanto a fixação química contribui com 49 milhões de mg de N  $\text{ano}^{-1}$  (MOREIRA, 2008).

O processo industrial que transforma o  $\text{N}_2$  em amônia ( $\text{NH}_3$ ) requer: hidrogênio; catalisador, altas temperaturas (300° a 600°C) e altas pressões (200 a 800 atm). Assim, o gasto de fontes energéticas por tonelada de amônia sintetizada é menor em barris de petróleo (HUNGRIA et al., 2007).

Um agravante na utilização dos fertilizantes nitrogenados é a baixa eficiência de utilização pelas plantas, inferior a 50%. Os fertilizantes nitrogenados estão altamente relacionados à poluição ambiental, pois a lixiviação do N e o escoamento desse nutriente pela superfície do solo resultam em acúmulo de formas nitrogenadas, o nitrato, nas águas dos rios, podendo atingir níveis tóxicos (HUNGRIA, 2007). As leguminosas que fixam  $\text{N}_2$ , são nutricionalmente mais exigentes, pois requerem os nutrientes necessários à planta hospedeira, ao rizóbio e ao sistema simbiótico.

Portanto, o estudo do elemento traço Cádmio (Cd), na cultura da soja, torna-se de extrema importância, pois, além da soja ser a cultura mais cultivada no Brasil e no mundo, as formas de manejo que são utilizadas para melhorias e manutenções da fertilidade dos solos tendem a adicionar estes elementos potencialmente tóxicos ao solo, às plantas, aos grãos e consequentemente aos seres humanos.

## REFERÊNCIAS

ABREU JUNIOR, C.H.; MARTIN NETO, L.; MILORI, D.M.B.P.; SIMÕES, M.L.; SILVA, W.T.L. Métodos analíticos utilizados em química do solo. In: ALLEONI, L.R.F.; MELO, V.F. (Ed.). Química e mineralogia do solo. V. 2, Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciências do Solo**, 2009. P. 529-685.

ADRIANO, D.C. Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals. 2nd ed. New York: **Springer Verlag**, 2001.

ALLOWAY, B.F. Heavy metals in soils. New York: John Wiley 1993. 399p.

ALLOWAY, B.J. Heavy metals in soils. New York: **Blackie Academic & Professional**, 1995. 368p.

BAIRD, C. *Química ambiental*. Porto Alegre: **Bookman**, 2002. 579 p.

BAKER, A. J. M.; BROOKS, R. R. Terrestrial higher plants which hyper accumulate metallic elements-a review of their distribution, ecology and phytochemistry. **Biorecovery**, Berkhamsted, v. 1, p. 81-86, 1989.

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

BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Respuestas de las plantas a la contaminación por metales pesados. **Suelo y Planta**, Madrid, v.2, p.345-361, 1992.

BARREIRA, Lidiana Domingues. **Efeito do pH na remoção de Cd<sup>2+</sup> em solução aquosa com ETS – 4**. Dissertação Mestrado Engenharia Química, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.

BEREZUK, A. G; GASPARETTO, N. V. L. Ocorrência de chumbo e zinco na água subterrânea de Maringá-PR. In: **XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. São Paulo, 2002.

BERGAMASCHI, C. Ocorrência de bactérias diazotróficas associadas às raízes e colmos de cultivares de sorgo. 2006. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BERTON, R.S. Riscos de contaminação do agrossistema com metais pesados. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. (Ed.). Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: **Embrapa Meio Ambiente**, 2000. p.259-268.

BIONDI, C. M. **Teores naturais de metais pesados nos solos de referência do Estado de Pernambuco**. 2010. 70f. Tese - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2010.

BLOTTNER, S. et al. Influence of environmental cadmium on testicular proliferation in roe deer. **Reproductive Toxicology**, Louisville, v.13, p.261-267, 1999.

BRECKLE, S.W.; KAHLE, H. Effects of toxic heavy metals (Cd, Pb) on growth and mineral nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.). **Vegetatio**, Den Haag, v.101, p.43-53, 1992.

BROOKES, P.C. The use of microbial parameters in soil pollution by heavy metals. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.19, p.269-279, 1995.

CAMPOS, M.L. et al. Determinação de cádmio, cobre, cromo, níquel, chumbo e zinco em fosfatos de rocha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília (DF), v.40, p.361-367, 2005.

CARRÃO-PANIZZI, M. C.; BERTAGNOLLI, P. F.; STRIEDER, M. L.; COSTAMILAN, L. M.; MOREIRA, J. U. V. Melhoramento de Soja para Alimentação Humana na Embrapa Trigo – Safra Agrícola 2011/2012. Passo Fundo/RS. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - **Embrapa Trigo**. ISSN 1516-5582, p. 27-31, 2012.

CARVALHO, N. M. e NAKAGAWA, J. Sementes: ciências, tecnologia e produção. 2.ed. Campinas: Fundação Cargill, 2000. 565p.

CASTILHO, Ricardo. Agronegócio e Logística em Áreas de Cerrado: expressão da agricultura científica globalizada. **Revista da ANPEGE**. v. 3, p. 33 - 43, 2007.

CAVALCANTE, A.K.; SOUSA, L.B. Determinação e avaliação do teor de óleo em sementes de soja pelos métodos de ressonância magnética nuclear e soxhlet. Biosci. 2010. **Jornal Uberlândia**, p. 8-15.

CHANDER, K.; JOERGENSEN, R.G. Decomposition of <sup>14</sup>C glucose in two soils with different amounts of heavy metal contamination. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.33, p.1811-1816, 2001.

CHANEY, R.L. Health risks associated with toxic metals in municipal sludge. In: BITTON, G.; DAMRON, B.L.; EDDS, G.T.; DAVIDSON, J.M. (Ed.). Sludge-health risks of land application. Ann Arbor: Ann Arbor Science Publishers, 1980. P.59-83.

CHANEY, R.L.; OLIVER, D.P. Sources, potential adverse effects and remediation of agriculture soil contaminants. In: NAIDU, R. (Ed.). Contaminants and the soil environment in the Australasia-Pacific region. **Kluwer Academic Publishers**, 1996. p.323-359.

CHEN, S.L.; KAO, C.H. Glutathione reduces the inhibition of rice seedlings root growth caused by cadmium. **Plant Growth regulation**, Dordrecht, v.16, p.249-252, 1995.

CHITOLINA, J. C.; SILVA, F. C.; ABREU, M. F. de; PALMA, F. M. de S.; CARMO, J. B. do. **Decomposição da matéria orgânica de compostos de lixo urbano e posterior preparo de extratos nítrico perclórico**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2001. 12 p. (Embrapa Informática Agropecuária. Circular Técnica, 1).

CLAIBORNE, W. Beethoven: a life undone by heavy metal? **Washington Post**, 18 de outubro de 2000.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. 2020. **Acompanhamento da safra brasileira**. Disponível em: [www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br).

COOBET, G.P. et al. Accumulation of heavy metals by vegetables grown in mine wastes. **Environmental Toxicology and chemistry**, Texas, v.19, p.600-607, 2000.

COSTA NETO, P. R. & ROSSI, L. F. S. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em fritura. **Química Nova**, v.23, p. 4, 2000.

DAS, P.; SAMANTARAY, S.; ROUT, G.R. Studies on cadmium toxicity in plants: a review. **Environmental Pollution**, Massachusetts, v.98, n.1, p.29-36, 1997.

DEL RIO, Daniele. **Biossorção de cádmio por leveduras *Saccharomyces cerevisiae***. Dissertação Mestrado em Agronomia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Quiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Brasília: **Embrapa Produção de Informação**, 2011. 306 p.

EMBRAPA. Tecnologias de produção de soja: região central do Brasil 2012 e 2013. Londrina: **Embrapa Soja**, 2007. 264p. (Sistemas de Produção, 15).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Tecnologias de produção de soja**: região central do Brasil, 2017. Londrina: Embrapa Soja/Embrapa Cerrados/ Embrapa Agropecuária Oeste/ Fundação Meridional, 2017. 239p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 6).

ESSINGTON, M.E. Soil and water chemistry: an integrative approach. **Boca Raton**, CRC Press, 2004. 534p.

FAGERIA, N.K.; ZIMMERMANN, F.I.P. & LOPES, A.M. Resposta do arroz irrigado à aplicação de fósforo, zinco e calcário. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 1:72-76, 1977.

FERREIRA, A.S.; CAMARGO, F.A.O.; TEDESCO, M.J.; BISSANI, C.A. Alterações de atributos químicos e biológicos de solo e rendimento de milho e soja pela utilização de resíduos de curtume e carbonífero. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 2003.

GIMBERT, Frederic; Vijver, Martina G.; Coeurdassier, Michael; Scheifler, Renaud; Peijnenburg, Willie J. G. M.; Badot, Pierre-Marie; Vaufleury, Annette; How Subcellular Partitioning Can Help to Understand Heavy Metal Accumulation and Elimination Kinetics in Snails; **Environmental Toxicology & Chemistry**. Vol. 27, 2008.

GIMENO-GARCIA, E.; ABREU, V.; BOLUDA, R. Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilisers and pesticide to rice farming soils. **Environmental Pollution**, London, v.92, p.19-25, 1996.

GONÇALVES Jr., A. C., NACKE, H., SCHWANTES, D., COELHO, G. F. Heavy Metal Contamination in Brazilian Agricultural Soils due to Application of Fertilizers. In: HERNANDEZ-SORIANO, M. C. (Ed.). **Environmental Risk Assessment of Soil Contamination**. Ed. Intech Open, 2015. p. 105-135.

GONÇALVES JUNIOR, A.C.; PESSOA, A.C.S. Fitodisponibilidade de Cádmio, Chumbo e Crômio, em soja cultivada em argilossolo vermelho eutrófico a partir de adubos comerciais. **Scientia Agrária**, Curitiba, v.3, n.1-2, p.19-23, jan./dez. 2002.

GUILHERME, L.R.G. & ANDERSON, S.J. Copper sorption kinetics in two oxide-rich soils (Oxisols): effect of phosphate pretreatment. In: JENNE, E.A., ed. Adsorption of metals by geomedias: variables, mechanisms, and model applications. San Diego, **Academic Press**, 1998. p. 209-228.

GUILHERME, L.R.G.; MARCHI, G. Metais em fertilizantes inorgânicos: avaliação de risco à saúde. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos - **ANDA**, 2007. 147 p.

GUILHERME, PIERANGELI, et al. *Elementos- traços em solo e sistemas aquáticos*. 2005. 345-390f. **Tópicos Ciências do Solo**. 2005.

Guisard, Cármen Luiza Martins Pães; A Vigilância Ambiental em Saúde Sobre o Uso Agrotóxico em um Município do Vale de Paraíba; Universidade de Taubaté; Taubaté; Brasil; 2006.

HART, J. J. et al. Characterization of cadmium binding, uptake, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars. **Plant Physiology**, Rockville, v. 116, n. 1, p. 1413-1420, Jan. 1998.

HARTWING, A. Carcinogenicity of metal compounds: possible role of DNA repair inhibition. **Toxicology Letters**, Washington, p.235-239, 1998.

HÖFS, A.; SCHUCH, L.O.B.; PESKE, S.T.; BARROS, A.C.S.A. Efeito da qualidade fisiológica das sementes e da densidade de semeadura sobre o rendimento de grãos e qualidade industrial em arroz. **Revista Brasileira de Sementes**, v.26, n.1, p.55-62, 2004.

HUERGO, L.F.; NOINDORF, L.; SOUZA, E.M.; STEFFENS, M.B.R.; YATES, M.G.; PEDROSA, F.O.; CHUBATSU, L.S. Partial cloning of the ammonium transporter genes of *Azospirillum brasilense* and *herbaspirillum seropedicae*. In: PEDROSA, F. O.; HUNGRIA, M.; YATES, M. G.; NEWTON, W. E. **Nitrogen fixation: from molecules to crop productivity**. 127p., 1999.

HUNGRIA, M.; RUBENS JOSÉ CAMPOS, I. C. M. A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro. **Embrapa Soja**, Documentos 283, Londrina, PR, 2007.

JÄRUP, Lars; ÅKESSON, Agneta. **Current status of cadmium as an environmental health problem**. Toxicology and Applied Pharmacology, vol. 238, Ed. 3, p. 201-208, 2009.

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

KASUYA, M. Recent epidemiological studies on itai-itai disease as a chronic cadmium poisoning in Japan. **Water Science Technology**., 42:147-154, 2000.

LENNTECH, Water treatment Solution. **Cadmium – Cd**. Site institucional 2012.

LIN, X.; ALBER, D.; e R. Henkelmann, Analytical and bioanalytical chemistry, 2004, 379, 218-220.

MARCHIORI Jr., M. **Levantamento inicial de chumbo, cádmio, níquel, cromo e cobre em pomares de produção comercial no Estado de São Paulo**. 2003. 138 f. Tese Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

MATSUDA, A.; SOUZA, F.M. de; OSWALDO, J. Tolerância de rizóbios de diferentes procedências de zinco e, cobre e cádmio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, p.343-355, 2000.

MATTIAZZO-PREZOTTO, M.E. **Comportamento de cobre, cádmio, cromo, níquel e zinco adicionados a solos de clima tropical em diferentes valores de pH**. Tese - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 1994.

McBRIDE, M.B. Environmental chemistry of soils. New York, **Oxford University Press**, 1994. 406p.

McLAUGHLIN, M.J.; SINGH, B.R. **Cadmium in soil and plants**. Dordrecht: Kluwer, 1999. 269p.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; SILVA, F.C.; BOARETTO, A.E. Uso de resíduos sólidos urbanos na agricultura e impactos ambientais. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 26., 1997, Rio de Janeiro, 1997. p. 28.

MENEGATTI, A.L.A.; BARROS, A.L.M. Análise comparativa dos custos de produção entre soja transgênica e convencional: um estudo de caso para o Estado do Mato Grosso do Sul. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v.45, n.1, p.163-183, 2007.

MOREIRA, C.S. **Adsorção competitiva de cádmio, cobre, níquel e zinco em solos**. Piracicaba: ESALQ, 2004. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

NOLAN, A.L.; LOMLI, E.; McLAUGHLIN, M.J. Metal bioaccumulation and toxicity in soils: why bother with speciation? **Australian Journal of Chemistry**, Oxford, v.56, p.77-91, 2003.

OOST, R. V. D.; BEYER, J.; VERMEULEN, N. P. E. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 13, p. 57-149, 2003.

PALLU, Ana Paula de Souza. **Biossorção de linhagens de Aspergillus sp**. Dissertação Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

PIERANGELI, M.A.P.; GUILHERME, L.R.G.; CURI, N.; SILVA, M.L.N.; LIMA, J.M.; COSTA, E.T.S. Efeito do pH na adsorção e dessorção de cádmio em Latossolos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.523-532, 2005.

PIERZYNSKI, G.M.; SIMS, J.T. & VANCE, G.F. **Soils and environmental quality**. Boca Raton, Lewis Publishers, 1994. 313p.

REDDY, G.N.; PRASAD, M.N.V. Heavy metal binding proteins/peptides: Occurrence, structure, synthesis and functions: a review. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v.30, p.251-264, 1990.

ROESSING, A.C; MENEGHELO D.G. Perspectiva de crescimento da produção da soja no Mato Grosso frente a política de subsídios dos Estados Unidos. **Embrapa**, 2001.p13-46.

SEDIYAMA, T.; PEREIRA, M.G.; SEDIYAMA, C.S.; GOMES, J.L.L. **A cultura da soja**. Viçosa: UFV, 2009. v.2.

SHAW, A.J. Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects. New York, **CRC Press**, 2004. 355p.

SOARES, C. R. F. S.; SIQUEIRA, J. O.; CARVALHO, J. G.; MOREIRA, F. M. S. Fitotoxicidade de cádmio para *Eucalyptus maculata* e *E. urophylla* em solução nutritiva. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, p. 175-183, 2005.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Adubação com nitrogênio. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed). Cerrado: correção do solo e adubação. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, 2004. P. 129-145.

SPARKS, D.L. Environmental soil chemistry. San Diego: **Academic Press**, 1995. 23-51p.

TAKIZAWA, Y. Understanding Minamata disease and strategies to prevent further environmental contamination by methylmercury. **Water Science Technology.**, 42:139-146, 2000.

UEMURA, T. Experimental reproduction of “Itai-itai” disease: a chronic cadmium poisoning of humanus in rats and monkeys. **Journal Veterinary Research**, Queensland, v.48, p.15-28, 2000.

VARGAS, M. A. T.; SUHET, A. R.; MENDES, I. C.; PERES, J. R. Fixação biológica de nitrogênio em solos de cerrados. Brasília: **EMBRAPA – CPAC**: EMBRAPA – SPI, 1994.

VIEIRA, L.M. Penas de Aves como indicadores de mercúrio no Pantanal. Corumbá, MS: **Embrapa Pantanal**, 2007. 3p. (ADM – Artigo de Divulgação na Mídia, n.097)

VILAR, Vítor Jorge Pais. **Remoção de lões Metálicos em solução aquosa por resíduos de indústrias de extração de agar**. Tese doutorado em Engenharia Química – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2006.

WAALKES M. Cadmium carcinogenesis in review. **Journal of Inorganic Biochemistry**, New York, v.79, n.1-4, p.241-244, 2000.

ZAIED, K.A.; EL-HADY, A.H.; AFIFY, A.H.; NASSEF, M.A. Yield and nitrogen assimilation of winter wheat inoculated with new recombinant inoculants of rhizobacteria. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v.4, n.2, p.344-358, 2003.

## CAPÍTULO 1

### GERMINAÇÃO E BIOMETRIA INICIAL DE CULTIVARES DE SOJA SUBMETIDAS A CÁDMIO

#### RESUMO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) se destaca no mundo como uma das culturas de maior importância econômica. Os elementos traço (ETs) como o Cd podem ser absorvidos pelas plantas e incorporados nas cadeias tróficas, trazendo riscos aos organismos expostos. Objetivou-se avaliar a toxicidade do Cd em cultivares de soja com diferentes ciclos de maturação. O experimento foi conduzido na Universidade de Rio Verde – GO, foi avaliada a toxicidade do Cd em diferentes cultivares de soja. Foram adicionadas doses crescentes às sementes de soja, onde foram avaliados a germinação, altura de plantas (AP), comprimento de raiz (CR), massa fresca de parte aérea e de raiz (MFPA e MFR) e massa seca de parte aérea e de raiz (MSPA e MSR) e Análise de Componentes Principais (PCA). O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x 11 com 3 repetições (3 doses de Cd, 0, 2,5 e 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$  e 11 cultivares). A presença do elemento traço Cd afetou a germinação das cultivares de soja, sendo a dose 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$  a que apresentou as maiores influências. Nos resultados obtidos, as cultivares de ciclo de maturação tardio sofrem efeito na dose maior 5  $\mu\text{g L}^{-1}$  de Cd, enquanto nas de ciclo precoce e médio isto ocorreu na dose 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$  do elemento. A cultivar SYN 13671 foi a que apresentou os maiores prejuízos no desenvolvimento devido à exposição ao Cd. As cultivares sem exposição ao Cd apresentaram comportamentos semelhantes, agrupando-se nas partes positivas dos componentes 1 e 2, variando de 0 a 5 positivo. Na dose de 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$  não houve agrupamento e, para a dose de 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ , as cultivares apresentaram médio agrupamento. Conclui-se que a presença do cádmio afeta a maioria das cultivares de soja comercializadas, trazendo prejuízos aos produtores rurais.

**Palavras-chave:** Elemento traço, Emergência, Grupo de maturação.

## CHAPTER 1

### GERMINATION AND INITIAL BIOMETRY OF SOYBEAN CULTIVARS SUBMITTED TO CADMIO

#### ABSTRACT

Soy (*Glycine max* (L.) Merrill) stands out in the world as one of the most economically important crops. Trace elements (ETs) such as Cd can be absorbed by plants and incorporated into the food chains, bringing risks to exposed organisms. The objective was to evaluate the toxicity of Cd in soybean cultivars with different maturation cycles. The experiment was carried out at the University of Rio Verde - GO, the toxicity of Cd in different soybean cultivars was evaluated. Increasing doses were added to soybean seeds, where germination, plant height (AP), root length (CR), fresh shoot and root mass (MFPA and MFR) and dry shoot and shoot weight were evaluated root (MSPA and MSR) and Principal Component Analysis (PCA). The design used was completely randomized (DIC), in a 3 x 11 factorial scheme with 3 replications (3 doses of Cd, 0, 2.5 and 5.0  $\mu\text{g L}^{-1}$  and 11 cultivars). The presence of the trace element Cd affected the germination of soybean cultivars, with the dose 2.5 $\mu\text{g L}^{-1}$  being the one with the greatest influences. In the results obtained, the cultivars of late maturation cycle suffer an effect in the higher dose 5 $\mu\text{g L}^{-1}$  of Cd, while with those of early and medium cycle this occurred in the dose 2.5 $\mu\text{g L}^{-1}$  of the element. The cultivar SYN 13671 was the one that presented the greatest losses in development due to exposure to Cd. The cultivars without exposure to Cd showed similar behaviors, grouping in the positive parts of components 1 and 2, ranging from 0 to 5 positive. At the dose of 2.5  $\mu\text{g L}^{-1}$ , there was no clustering and for the dose of 5.0  $\mu\text{g L}^{-1}$ , cultivars showed medium clustering. It is concluded that the presence of Cadmium affects most of the commercialized soybean cultivars, causing losses to rural producers.

**Key words:** Trace element, Emergency, Maturation group.

## 1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) se destaca no mundo como uma das culturas de maior importância econômica. Os seus grãos são utilizados pela agroindústria, em especial para produção de óleo vegetal e rações animais, além do uso como alimento. Nos últimos anos, a utilização da soja cresceu bastante como fonte de biocombustível (FREITAS, 2011; EMBRAPA-SOJA, 2015). A soja é vista no mercado como uma das principais fontes de produção de óleos, além de gerar outros produtos, e ganhou grande destaque na pauta de exportação do país (SILVA, 2015).

A importância do agronegócio na economia brasileira é indiscutível (CEPEA, 2011). A soja, na região de Goiás, é um fator primordial para o desenvolvimento da economia, o estado é um dos maiores produtores do grão no país, uma vez que há uma representação significativa no PIB. Goiás, juntamente com o município de Rio Verde - GO, possui cerca de 233.000 milhões de hectares plantados da soja, o que movimenta a economia do estado (EMBRAPA SOJA,1999).

Altas produtividades de soja dependem do manejo dado a todo o sistema, destaca-se o manejo da fertilidade do solo (FAGERIA et al.,1995). Os insumos utilizados na calagem e adubação que visam à construção da fertilidade do solo podem apresentar na sua composição elementos-traço (ETs), como cádmio (Cd) em variadas concentrações (CAMPOS et al., 2005).

A utilização de insumos ou subprodutos com a finalidade corretiva ou nutricional também representa possíveis fontes de contaminação do solo, sendo classificados como fontes não pontuais de poluição, como a aplicação de fertilizantes e fungicidas (GUILHERME et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2010).

Os elementos-traço (ETs) não são modificados nem degradados (BIONDI, 2010), são persistentes. Além de ocorrerem naturalmente em solos, suas concentrações podem sofrer aumento, principalmente em decorrência de processos antrópicos, gerando grande preocupação quanto às suas implicações negativas ao homem e ao ambiente.

Apesar da essencialidade de alguns elementos às plantas, como zinco (Zn), estes podem causar desequilíbrios ecológicos (PELOZATO, 2008). As intoxicações por elementos traço que ocorrem com mais frequência são pelos elementos tóxicos chumbo e cádmio, que alteram as estruturas celulares, enzimas e podem substituir micronutrientes essenciais ao metabolismo dos organismos vivos como o cobre e o zinco (VIRGA et al., 2007).

ETs como o Cd podem ser absorvidos pelas plantas e incorporados nas cadeias tróficas, trazendo riscos e efeitos adversos aos organismos ecológicos expostos (MUÑOZ, 2002). Quanto aos seres humanos, os efeitos tóxicos dos elementos traço dependem do grau de exposição, podendo apontar como efeito adverso: danos ao sistema nervoso, sistema hepático, sistema renal e sistema esquelético, além de uma série de doenças carcinogênicas (MUÑOZ, 2002).

Nem todos os órgãos das plantas possuem a mesma sensibilidade quanto à acumulação de elementos traço. Normalmente, a raiz é o órgão prioritário de entrada e acumulação. A toxidez de um elemento deve ser acompanhada e, por isso, medida pelas seguintes variáveis: massa fresca e seca de parte aérea e de raiz, germinação, altura de plantas e comprimento de raiz (PAVAN, 1996).

Um efeito claro da toxidez pelo Cd pode ser observado na germinação. Quando sementes são postas a germinar em ambiente com altos níveis de cádmio, a atividade das  $\alpha$  e  $\beta$  amilases é reduzida, comprometendo a respiração (CHUGH & SAWHNEY, 1996), resultando na inibição do crescimento do eixo embrionário e da radícula (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2000; SHAW et al., 2004).

A presença de Cd causa efeitos na atividade enzimática. Segundo Kurdziel et al. (2004) e Lösch (2004) o alto potencial da ação do metal Cd são enzimas e proteínas, que contêm grupos sulfidril (SH). A presença do Cd leva à oxidação destes grupos que, reagindo com o enxofre, destrói as ligações dissulfeto, desnaturando a proteína, resultando na redução da atividade enzimática. Vários exemplos deste efeito foram descritos no Ciclo de Krebs na mitocôndria (SHAW et al., 2004).

O Cd pode reduzir o crescimento de caules devido à supressão do alongamento das células (SANITÀ DI TOPPI & GABRIELLI, 1999).

Baseado no exposto, verifica-se que o Cd pode causar sérios danos às plantas o que faz-se necessário responder: materiais de soja sofrem negativamente na presença de Cd?

Para responder a esta pergunta, objetivou-se avaliar a toxicidade do Cd em cultivares de soja com diferentes ciclos de maturação.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na UniRV - Universidade de Rio Verde, coordenadas 17°47'18"S 50°57'31"W, com clima do tipo Aw. 23,3°C segundo

Koppen, altitude 739 m, onde foram cultivadas 11 cultivares de soja, de diferentes grupos de maturação (precoce: 95-100 dias, médio: 110-115 dias e tardio: 120-130 dias), no delineamento inteiramente casualizado (DIC) com 3 repetições em esquema fatorial 11 x 3. O primeiro fator é referente às cultivares e o segundo às doses de Cd utilizadas.

As cultivares de ciclo precoce avaliadas foram: TMG7063, M7110, NS7007, CD2700. As de ciclo médio foram compostas por: Guaiá7487, M7198, ANTA82, NS7505, SYN13671 e as de ciclo tardio foram: M7739, NS7901.

Foi realizado o plantio de 10 sementes por tratamento, em bandejas com areia lavada e peneirada, na proporção de 1:1 (areia fina e grossa), para que não ocorresse interferência de outros contaminantes. Cada bandeja possuía 1,4 kg de areia onde foram aplicadas as doses de Cd.

As doses utilizadas foram de 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$  e 5  $\mu\text{g L}^{-1}$  com três repetições para cada cultivar. Para as doses, foi levado em consideração o teor máximo dos ETs na solução do solo (CONAMA, 2012), sendo esta a menor dose utilizada de cada ET. Foi semeada também a testemunha livre do Cd com todas as onze cultivares e três repetições.

As avaliações foram realizadas após os 15 dias da semeadura, momento em que se quantificou as plântulas normais, anormais, infeccionadas e mortas, conforme as Regras para Análises de Sementes (RAS) (BRASIL, 2009), cujos resultados obtidos foram expressos em porcentagem (%).

Após as avaliações de germinação, foram realizadas com auxílio de régua as medições dos parâmetros: altura de plantas (AP), comprimento de raiz (CR), massa fresca de parte aérea (MFPA), massa fresca de raiz (MFR), massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR).

Os resultados obtidos foram submetidos a análise de variância (ANAVA) pelo programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011). Quando houve significância, as médias foram submetidas ao teste Scott-Knott para diminuição de ambiguidades com significância a 5%.

Posteriormente, os resultados foram submetidos à análise de componentes principais (ACP), com utilização do programa Past3 (HAMMER, 2017). Foram realizadas duas formas de análise dos dados, onde na primeira foram utilizados os resultados de cada cultivar nas três doses de Cd avaliadas (0,0, 2,5 e 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ ). No segundo formato, foram utilizados as 11 cultivares agrupadas por doses de Cd.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para toxicidade de Cd na média das cultivares de ciclo precoce (TMG7063, M7110, NS7007, CD2700) permitem observar que na dose de  $2,5 \mu\text{g L}^{-1}$  houve maior toxicidade, apresentando 18% de morte das sementes na dose de  $2,5 \mu\text{g L}^{-1}$ . O mesmo resultado foi encontrado em cultivares do ciclo médio (GUAIA7487, M7198, ANTA82, NS7505, SYN13671). Em cultivares de ciclo tardio (M7739, NS7901), a maior toxicidade do elemento Cd apresentou-se na dose  $5 \mu\text{g L}^{-1}$  com 25% de mortalidade e 10% com anormalidades nas sementes (Figura 1).

A dose de  $2,5 \mu\text{g L}^{-1}$  de Cd provocou a maior redução da porcentagem de germinação. Quando comparados os ciclos, os resultados mostram que cultivares de ciclo tardio sofrem efeito na dose maior  $5 \mu\text{g L}^{-1}$  de Cd, enquanto as de ciclo precoce e médio sofrem efeito na dose  $2,5 \mu\text{g L}^{-1}$  do elemento (Figura 1).

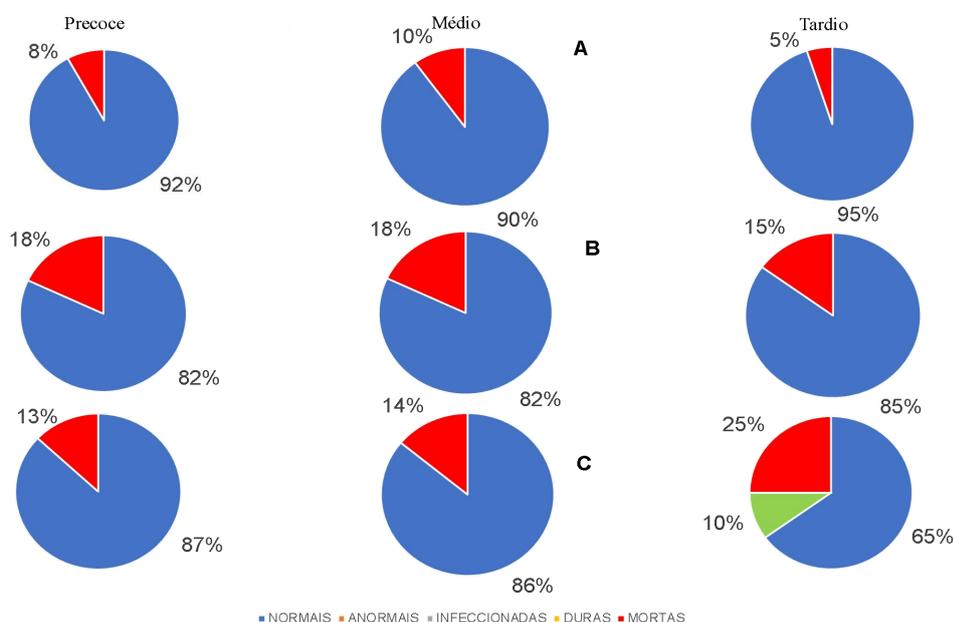


Figura 1 - Toxicidade média de doses de Cd em cultivares de ciclos precoce, médio e tardio. A: Testemunha, B:  $2,5 \mu\text{g L}^{-1}$  e  $5,0 \mu\text{g L}^{-1}$ .

Quando se compara as cultivares de ciclo precoce, observa-se que as mais sensíveis na dose  $2,5 \mu\text{g L}^{-1}$  foram a TMG7063 e M7110, pois apresentaram respectivamente 30 e 20% de plântulas mortas. Entretanto, a cultivar TMG7063 foi mais sensível na maior dose de Cd,  $5,0 \mu\text{g L}^{-1}$ , apresentando 20% de mortalidade (Figura 2).

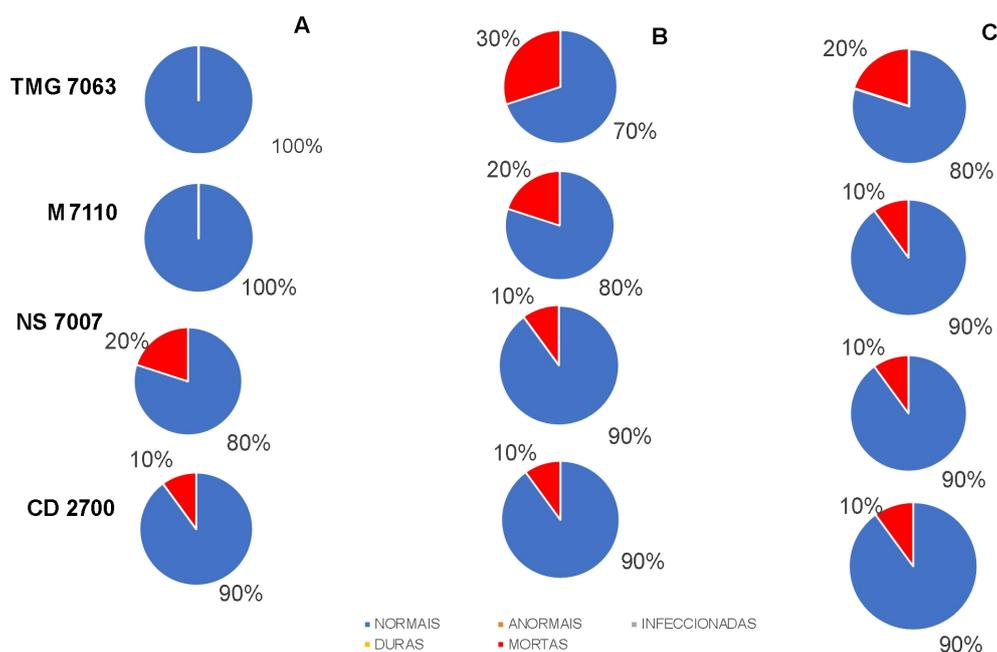


Figura 2 - Toxicidade de Cd em cultivares de ciclo de maturação precoce. A: Testemunha, B: 2,5 µg L<sup>-1</sup> e 5,0 µg L<sup>-1</sup>.

Em cultivares do ciclo médio, observou-se que na dose 2,5µg L<sup>-1</sup> foram mais sensíveis as cultivares GUAIÁ7487, com 30% de mortalidade, ANTA82 e M7198, ambas com 20% de plântulas mortas. Entretanto, na maior dose, 5 µg L<sup>-1</sup>, a cultivar GUAIÁ7487 apresentou 20% de plântulas mortas (Figura 3).

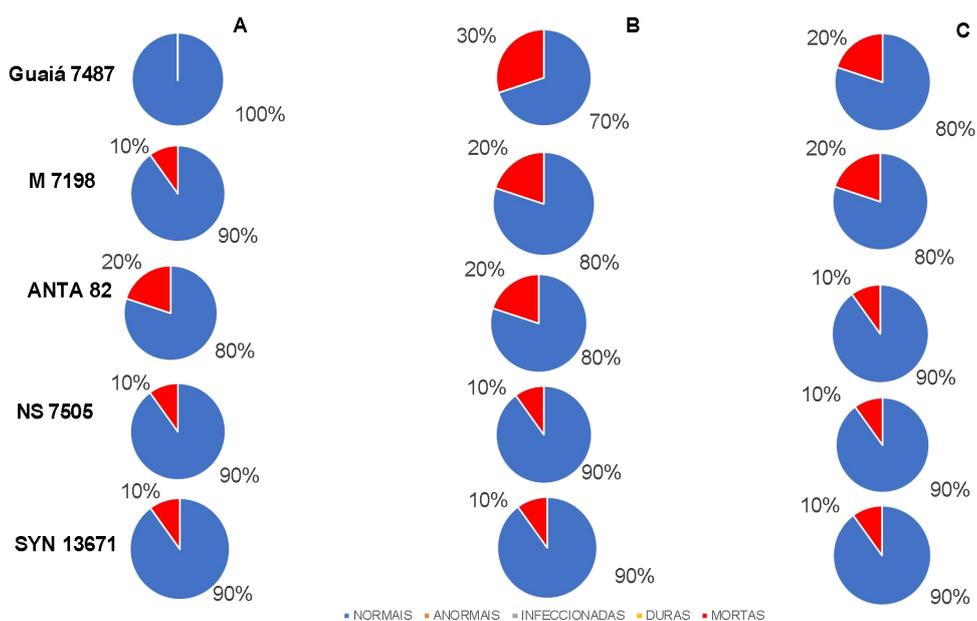


Figura 3 - Toxicidade Cd em cultivares de ciclo de maturação médio. A: Testemunha, B: 2,5 µg L<sup>-1</sup> e 5,0 µg L<sup>-1</sup>.

Em cultivares do ciclo tardio, a cultivar M7739 apresentou 20% de anormalidade e 20% das plântulas mortas, porém a cultivar NS7901 apresentou 30% de mortalidade, ambas na dose 5  $\mu\text{g L}^{-1}$  de Cd (Figura 4).

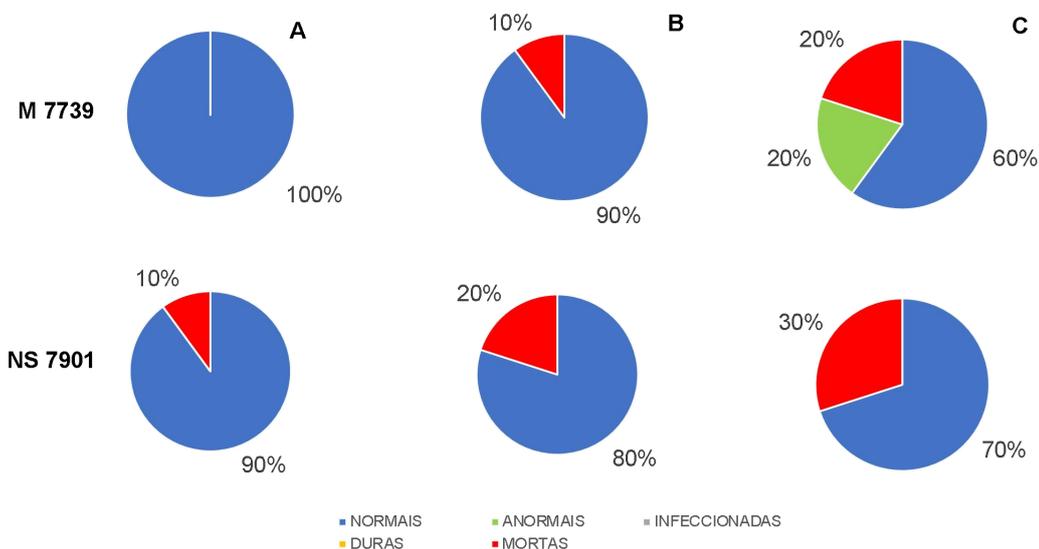


Figura 4 - Toxicidade Cd em cultivares de ciclo de maturação tardio. A: Testemunha, B: 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$  e 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ .

O potencial de germinação varia conforme a espécie e o valor de pH do solo. Em maiores valores de pH do solo, a germinação foi maior quando comparados ao pH mais baixo, o que sugere haver menor translocação de Cd para a parte aérea, promovendo então maior toxicidade na raiz. Estes resultados sugerem que a calagem atenua significativamente os efeitos tóxicos do Cd (ROVEDA et al., 2014).

GONG et al. (2001) também verificaram comportamento diferenciado entre espécies na resposta à fitotoxicidade de Cd, sendo o feijão (*P. vulgaris*) e a aveia (*A. sativa*) menos sensíveis, tanto na germinação quanto na biomassa da parte aérea, em comparação ao nabo (*Brassica rapa*) e agrião (*Lepidium sativum*).

Resultados sugerem que a germinação é menos sensível à toxicidade de Cd do que o crescimento. Isto ocorre porque, no estágio inicial do desenvolvimento (logo após a germinação), as plântulas são muito sensíveis ao estresse hídrico e é provável que o efeito mais acentuado neste parâmetro seja resultante da interferência no equilíbrio interno de água, uma vez que o Cd afeta a permeabilidade da membrana celular (BENAVIDES et al., 2005).

Peralta et al. (2001) afirmaram que doses altas de Cd podem causar desordens metabólicas e inibição da germinação em várias espécies. Munzuroglu & Geckil (2002) afirmaram também que o Cd reduziu a germinação de sementes de lentilha, mostarda e arroz.

Estes resultados são semelhantes aos encontrados por AN (2004), que considerou a germinação de sementes de milho, trigo e sorgo como um parâmetro de baixa sensibilidade na avaliação da toxicidade de Cd, comparado aos parâmetros crescimento da parte aérea e de raiz. Outros resultados semelhantes, mas com outras espécies vegetais, também foram observados por GONG et al. (2001) e LUAN et al. (2008).

Para Cd, o comportamento linear da porcentagem de germinação demonstra claramente sua toxidez, talvez agindo como inibidor enzimático. É sabido que quando sementes são postas a germinar em ambientes com altos níveis de cádmio, a atividade das enzimas  $\alpha$  e  $\beta$  amilase é significativamente reduzida, comprometendo a respiração (CHUNG; SAWHNEY, 1996), resultando na inibição do crescimento do eixo embrionário e da radícula (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2000).

O Cd pode ser tóxico na concentração  $100 \text{ mg L}^{-1}$  uma vez que a agência de proteção ambiental dos EUA (USEPA) considere nível tóxico o teor do metal que provoca uma redução de 50% do crescimento das plantas (KING, 1996). Na Europa, este índice cai para 25% (SAEFL, 1998).

Os resultados da ANAVA mostraram que ocorreram diferentes respostas nos parâmetros biométricos das cultivares de soja testadas em função da presença de cádmio no sistema. As cultivares apresentaram diferenças significativas quanto à altura de plantas (AP) nas doses de Cd avaliadas. Quando as sementes de soja não foram submetidas à presença do elemento traço (ET), observou-se que as cultivares M7739, Guaiá, TMG7063, NS7005, NS7007 e SYN13671 apresentaram as maiores APs, diferindo das outras cinco cultivares testadas. A mesma interpretação pode ser realizada quando há exposição das sementes ao Cd, sendo que na dose de  $2,5 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$  observa-se que as maiores AP ocorreram nas cultivares NS7005 e NS7007 e na dose de  $5,0 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ , isto aconteceu na M7110, NS7005, NS7007 e SYN13671 (Figura 5).

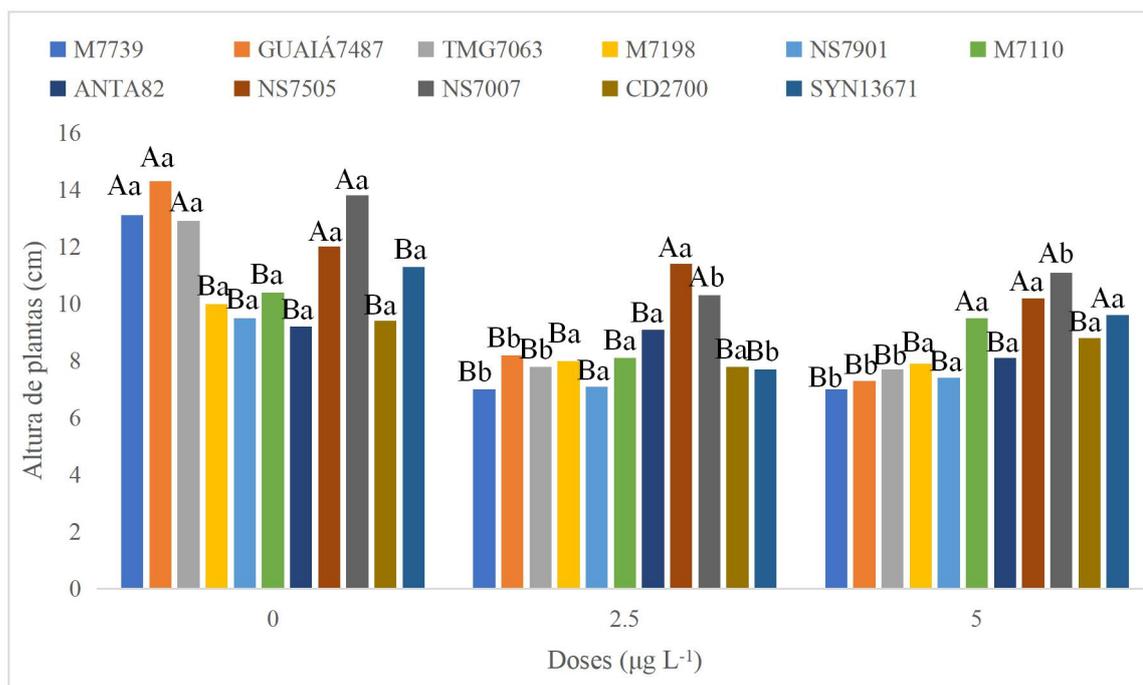


Figura 5 - Médias de alturas de plantas (cm) de onze cultivares de soja, de diferentes ciclos de maturação, em relação a doses de Cd ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Letras maiúsculas comparam todas as cultivares dentro da mesma dose e letras minúsculas comparam cada cultivar isolada nas três doses.

Verifica-se que as doses de Cd influenciaram na AP de algumas cultivares. Dentre as cultivares com maior AP, verifica-se que a M7739, Guaiá e TMG7063 reduziram a AP independente da dose de Cd a que as sementes foram expostas. Por outro lado, a cultivar NS7005 não sofreu alterações na sua AP ao nível de 5% de probabilidade. As cultivares consideradas inferiores, com relação a AP (verificadas pela dose zero de Cd), mostraram crescimento da parte aérea estáveis, pois não houve diferença indicada pela ANAVA, exceto na cultivar SYN13671, pois reduziu sua AP quando da exposição à dose de  $2,5 \mu\text{g L}^{-1}$  de Cd (Figura 5).

Katheeb et al. (2014) avaliaram o efeito do  $\text{Cd}^{+2}$  no crescimento e outros processos em chicória anã (*Cichorium pumilum*), utilizando doses de 50 a  $1600 \mu\text{M}$  ( $5,62$  a  $180 \text{mg kg}^{-1}$ ) de Cd e observaram que ele afetou severamente os processos fisiológicos, bioquímicos e moleculares dessa espécie. Segundo Baker e Chesnin (1975), teores acima de  $0,2 \text{mg kg}^{-1}$  de cádmio nas plantas já são considerados tóxicos e prejudiciais ao seu desenvolvimento.

Os resultados obtidos permitem afirmar que, para a variável altura de plantas (AP) em centímetros em relação às doses de Cd  $0$ ;  $2,5$  e  $5,0 \mu\text{g L}^{-1}$ , quando comparando-se as 11 cultivares dentro da mesma dose, foi apresentada diferença significativa em todas as doses estudadas, de acordo com a ANAVA. Na dose de  $0 \mu\text{g L}^{-1}$ , 5 das 11 cultivares apresentaram

os melhores resultados de AP, diferente das outras 6, que apresentaram os menores valores em cm, onde obteve-se médias que variaram de 14,26 cm (GUAÍÁ7487 dose 0,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) a 6,91 cm (M7739 dose 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) (Figura 5).

Houve redução nas alturas de plantas e é possível destacar que a cultivar GUAÍÁ 7487 foi a que apresentou os maiores prejuízos e a cultivar NS 7505, a que apresentou os menores prejuízos, não sendo afetada, independente da dose aplicada. Lembra-se que para a dose de 0  $\mu\text{g L}^{-1}$  de Cd, em todas as variáveis que foram estudadas, os resultados obtidos são resultados fisiológicos de cada cultivar.

Para a dose de 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$  de Cd, apenas duas das 11 cultivares apresentaram os maiores valores de AP, sendo as cultivares NS7505 e NS7007 (11,40 e 10,32 cm). Diferente das demais, que, de acordo com a estatística, apresentaram diferença significativa. Já para a dose de 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$  de Cd, o mesmo comportamento se apresenta para as cultivares M7110, NS7505, NS7007 e SYN13671, com os maiores resultados (9,52; 9,62; 10,28 e 11,18 cm), diferente das demais estatisticamente.

Foi possível observar que o desenvolvimento da parte aérea foi prejudicado na dose 2,5 e 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$  de Cd. A literatura mostra que esta redução no desenvolvimento pode ser resultado da redução da fotossíntese, pela deficiência de alguns elementos (SOUZA, 2003) e pela substituição do átomo de magnésio presente na clorofila por átomos do metal pesado, afetando as funções fotossintéticas, reduzindo as trocas gasosas pela indução do fechamento dos estômatos (KUPPER *et al.*, 1996). A compartimentação e a desintoxicação bioquímica de elementos traço são mecanismos de defesa da planta destacados por Malavolta (2006).

Resultados semelhantes foram observados em estudos com girassol, que mostram que o Cd afeta negativamente o crescimento das plantas (CHAVES *et al.*, 2011). A redução de crescimento do caule e da planta como um todo pode ser atribuída à redução da área foliar, aumento da clorose e necrose nas folhas e pela redução do sistema radicular das plantas. Tais sintomas são reflexos da concentração e distribuição de cádmio na planta e das interações desse elemento junto ao complexo de troca nas raízes do girassol.

Quando comparando cada cultivar em todas as doses de Cd na variável altura de plantas (AP), representado pelas letras minúsculas, das 11 cultivares que foram estudadas, 5 apresentaram diferença significativa, M7739, GUAÍÁ7487, TMG7063, NS7007 e SYN13671, apresentando prejuízos independente da dose aplicada.

Para a variável comprimento de raiz (CR), quando comparando as 11 cultivares na mesma dose, representado pelas letras maiúsculas, para a dose 0,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ , 6 cultivares apresentaram os maiores resultados de CR, diferente das demais que diferiram

significativamente. Obteve-se médias que variaram de 15,10 cm (SYN13671 dose 0,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) até 6,71 cm (NS7901 dose 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) (Figura 6).

A dose de 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$  de Cd resultou em três das 11 cultivares com os menores CR M7739 (8,26 cm), NS7901 (7,85 cm) e M7110 (8,92 cm). Diferentemente das demais, que não diferiram. Para a dose de 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$  de Cd, houve a mesma tendência da dose 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$ . Apenas três das 11 cultivares apresentaram os menores CR (M7739 (8,26 cm), M7198 (8,77 cm) e NS7901 (7,85 cm)). As demais não apresentaram diferença significativa. É possível afirmar que a cultivar M7739 foi a que apresentou os maiores prejuízos na presença do Cd, pois seu CR foi inferior às demais em todas as doses estudadas.

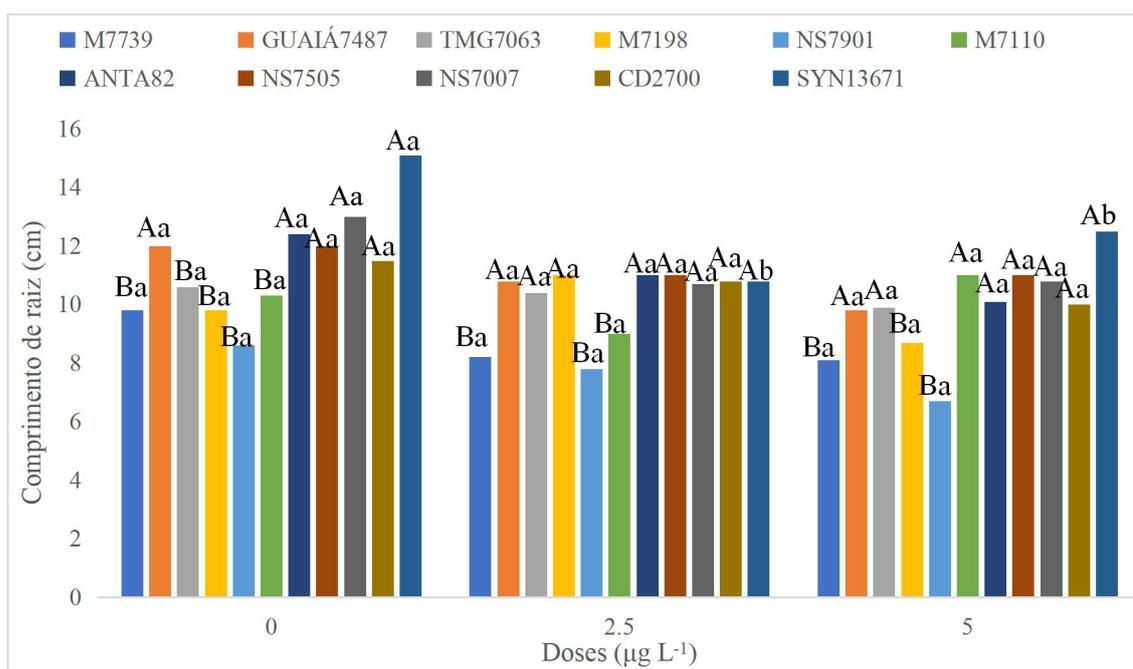


Figura 6 - Médias de comprimento de raiz (cm) de onze cultivares de soja, de diferentes ciclos de maturação, em relação a doses de Cd ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Letras maiúsculas comparam todas as cultivares dentro da mesma dose e letras minúsculas comparam cada cultivar isolada nas três doses.

Estes resultados indicam uma possível tolerância por parte de 6 das cultivares. Pela literatura, é comum inferir que esta tolerância da planta ao cádmio pode ser atribuída a mecanismos de defesa da planta, visto que estudos têm mostrado que plantas submetidas ao metal em questão aumentam a produção de fitoquelatinas (BARCELÓ POSCHENRIEDER, 1992). As fitoquelatinas são peptídeos ricos em cisteína, responsáveis pelo transporte raiz-parte aérea do cádmio e outros elementos, apresentando ainda propriedades quelantes (MELENDEZ et al., 2012).

Benavides, Gallego e Tomaro (2005) destacam que são várias as formas encontradas pelas plantas para evitar a toxicidade de elementos traço, seja operando em nível de raiz onde este é imobilizado por meio da parede celular e carboidratos extracelulares (mucilagem) ou pela ação da membrana plasmática, a qual representaria o melhor mecanismo de defesa.

Souza (2003) atribui a redução no crescimento das raízes em milho híbrido tratado com cádmio a fatores como menor respiração radicular, danos na permeabilidade das células e interferência nas membranas das células radiculares, além de danos sobre ATP-ases e outros transportadores.

O efeito inibitório do Cd no crescimento de raízes é atribuído à redução da mitose, danos no aparelho de Golgi, à síntese reduzida de componentes de parede celular e alterações no metabolismo de polissacarídeo. Em espécies como o milho (PÁL et al., 2006), a presença do Cd não parou a divisão celular mas inibiu o alongamento das células (LUX et al., 2010).

Quando comparando cada cultivar em todas as doses de Cd para CR (representado pelas letras minúsculas), das 11 cultivares que foram estudadas, apenas uma delas apresentou diferença significativa, a SYN13671. A cultivar apresentou prejuízos independente da dose aplicada, sendo este maior conforme o aumento da dose.

Para a variável massa fresca de parte aérea (MFPA) as médias das cultivares variaram de 5,24 g (SYN13671 dose 0,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) a 2,04 g (GUAIÁ7487 dose 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Comparando-se as cultivares na mesma dose, verifica-se na dose de 0  $\mu\text{g L}^{-1}$  de Cd que apenas quatro das 11 cultivares apresentaram os maiores resultados a M7198 (4,48 cm), M7110 (5,20 cm), NS7505 (4,26 cm) e SYN13671 (5,24 cm) diferindo-se das demais. Na dose de 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$  de Cd, assim como na dose de 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ , não foi demonstrada diferença significativa entre as cultivares para a dose (Figura 7).

Quando comparando cada cultivar em todas as doses de Cd (representado pelas letras minúsculas), das 11 cultivares que foram estudadas, três delas diferiam das demais (M7198, M7110 e SYN13671), apresentando prejuízos na MFPA independente da dose aplicada, mas este sendo maior na dose de 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$  (Figura 7).

Resultados obtidos por Lagriffoul (1998), que trataram plantas de milho em solução nutritiva com Cd, apresentaram diminuição da parte aérea e redução de biomassa. Wojcik e Tukendorf (1999) trabalhando com milho, trigo e centeio verificaram que a presença de Cd causou inibição do crescimento radicular, diminuição da massa fresca e de conteúdo de água nas raízes e na parte aérea.

Em feijão, além do Cd provocar redução da massa fresca de parte aérea e aérea foliar, também foi identificado o deslocamento desse metal da raiz para a parte aérea, mas a translocação do Cd para os grãos foi pequena (MATSUDA, 2000).

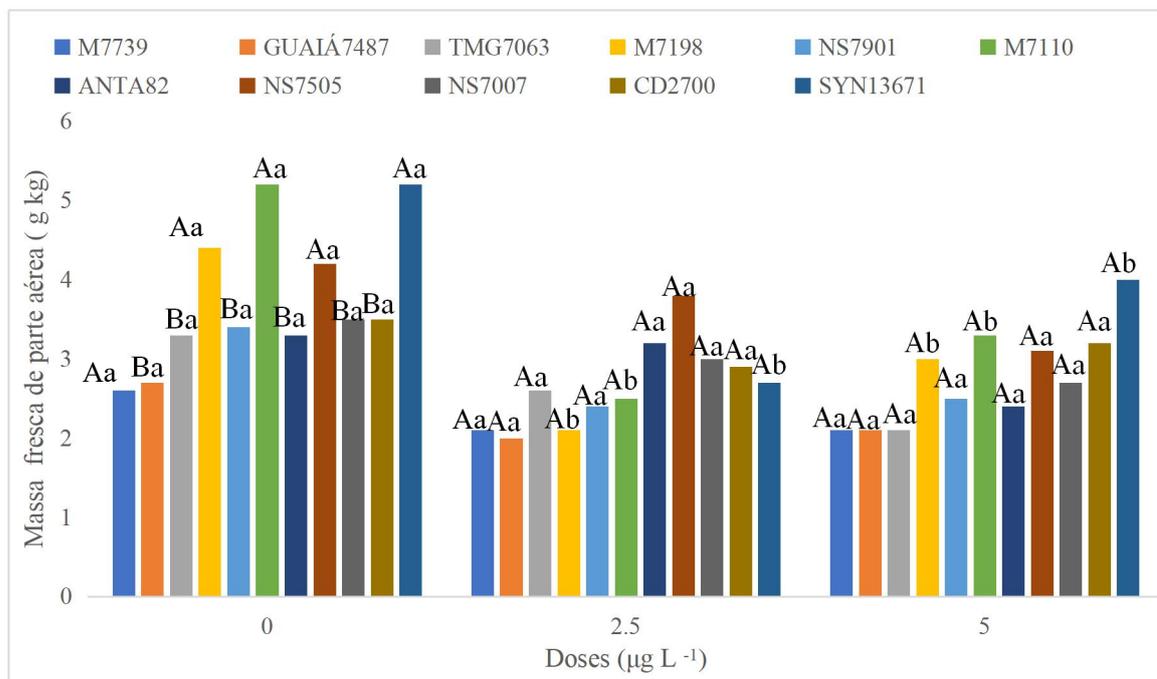


Figura 7 - Médias de massa fresca de parte aérea (MFPA) (g kg) de onze cultivares de soja, de diferentes ciclos de maturação, em relação a doses de Cd ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Letras maiúsculas comparam todas as cultivares dentro da mesma dose e letras minúsculas comparam cada cultivar isolada nas três doses.

A figura 8 mostra os resultados de massa fresca de raiz (MFR). Observa-se que as médias que variaram de 4,15 g na cultivar CD2700 sem aplicação de Cd a 1,41 g na cultivar ANTA82 na dose de  $5,0 \mu\text{g L}^{-1}$ .

Comparando-se as cultivares dentro da mesma dose, verifica-se que, na ausência de Cd, as cultivares diferiram, tendo as cultivares TMG 7063, M 7110, NS 7505, NS 7007, CD 2700 e SYN 13671 as respectivas MFR:3,83; 3,77; 3,66; 4,01; 4,15 e 4,14 cm, sendo estas as maiores. Entretanto, elas apresentaram-se superiores às demais doses.

Assim como na dose 0,0, na dose de  $2,5 \mu\text{g L}^{-1}$  de Cd, as mesmas 6 cultivares apresentaram os maiores e melhores valores, diferindo estatisticamente das demais. Já para a dose de  $5,0 \mu\text{g L}^{-1}$  de cd, das 11 cultivares, 5 apresentaram-se melhores, com maiores resistências a toxicidade do Cd (M7739, NS 7901, ANTA 82, NS 7505 e NS 7007).

Quando comparando cada cultivar em todas as doses de Cd (representado pelas letras minúsculas), das 11 cultivares que foram estudadas, apenas quatro delas apresentaram

diferença significativa, M7739, NS7505, NS7007 e CD2700 apresentando redução da MFR, independente da dose aplicada, mas foram agravados com o aumento da dose. Resultados semelhantes foram observados em estudos com o milho, que quando tratado com Cd, constatou-se diminuição da massa fresca de raízes (GALLI et al., 1996).

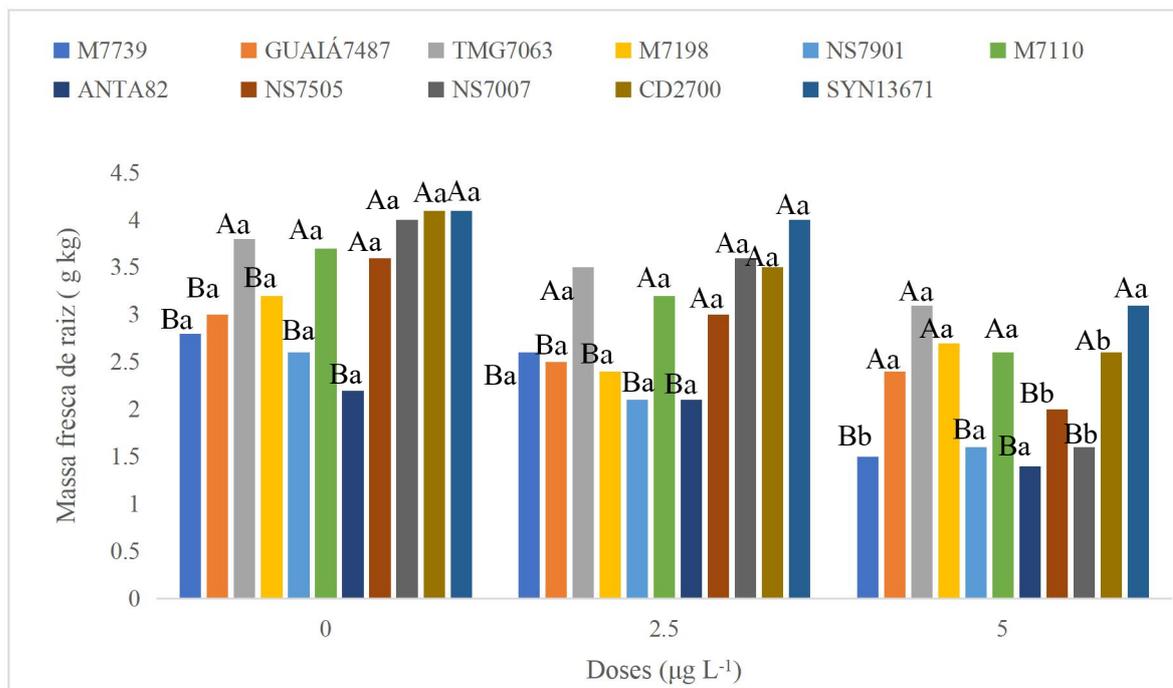


Figura 8 - Médias de massa fresca de raiz (MFR) (g kg) de onze cultivares de soja, de diferentes ciclos de maturação, em relação a doses de Cd ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Letras maiúsculas comparam todas as cultivares dentro da mesma dose e letras minúsculas comparam cada cultivar isolada nas três doses.

Para a variável massa seca de parte aérea (MSPA), comparando todas as cultivares dentro da mesma dose de Cd, na dose de  $0,0 \mu\text{g L}^{-1}$ , 6 das 11 cultivares que foram estudadas se apresentaram superiores às demais. As médias obtidas variaram de 1,99 g (SYN13671 dose  $0,0 \mu\text{g L}^{-1}$ ) a 0,98 g (GUAÍÁ7487 dose  $5,0 \mu\text{g L}^{-1}$ ). Para as doses de  $2,5 \mu\text{g L}^{-1}$  e de  $5,0 \mu\text{g L}^{-1}$  ambas não apresentaram diferença significativa (Figura 9).

Quando se comparam cada cultivar em todas as doses de Cd, observa-se que das 11 cultivares que foram estudadas, seis apresentaram diferença significativa, sendo elas as cultivares TMG7063, M7198, NS7901, NS7505, CD2700 e SYN13671. Os resultados obtidos mostram que a redução na MSPA ocorreu independente da dose aplicada e, conforme o aumento da dose, maior foi o prejuízo na MFPA.

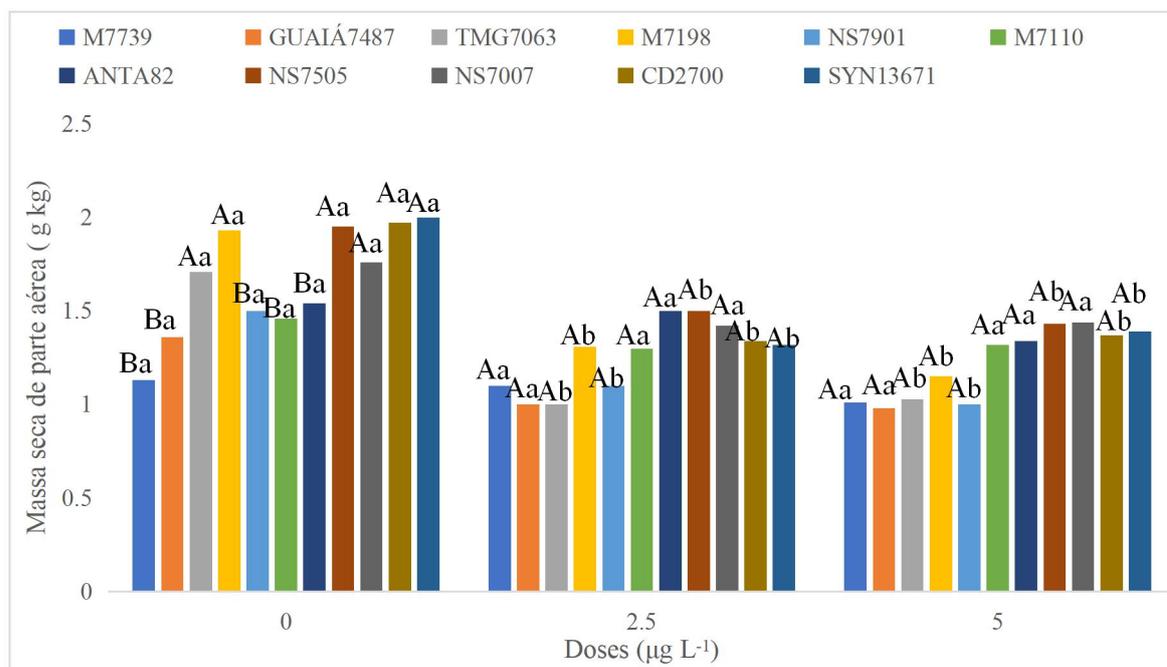


Figura 9 - Médias de massa seca de parte aérea (MSPA) (g kg) de onze cultivares de soja, de diferentes ciclos de maturação, em relação a doses de Cd ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Letras maiúsculas comparam todas as cultivares dentro da mesma dose e letras minúsculas comparam cada cultivar isolada nas três doses.

As matérias secas foram reduzidas conforme adição de Cd. Em concentrações mais elevadas de Cd em solução, a abertura estomática, transpiração, fotossíntese e os mecanismos de absorção passam a ser afetados pela toxicidade do elemento, acarretando menores taxas de absorção e, conseqüentemente, menor acúmulo de matéria seca (BENAVIDES et al., 2005).

Este fato também foi observado por Nascimento e Pereira (1997) e por Cardoso (2000) em experimentos realizados, respectivamente, com feijoeiro e com arroz submetidos ao Cd.

Para a característica avaliada, massa seca de raiz (MSR), quando se comparam as 11 cultivares em cada dose, a ausência de Cd proporcionou diferença significativa, sendo os melhores resultados obtidos nas cultivares NS7007, CD2700 e SYN13671. Seis cultivares apresentaram-se como resultados medianos (GUAIÁ 7487, TMG 7063, M 7198, NS 7901, M 7110 e NS 7505) e como piores resultados estão as cultivares M7739 e ANTA 82. A MSP variou entre 3,60 g na cultivar NS7007 com ausência de Cd a 0,89 g na cultivar M7739 com adição de 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ . Para a dose de 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$  de Cd, 6 das 11 cultivares apresentaram os melhores resultados, de acordo com a estatística. E para a dose de 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$  de Cd, não houve diferença significativa entre as cultivares na dose (Figura 10).

Comparando-se cada cultivar em todas as doses de Cd, das 11 cultivares que foram estudadas, seis delas apresentaram diferença significativa, M7739, NS7901, NS7505, NS7007,

CD2700 e SYN13671 apresentando redução na MSR, independente da dose aplicada. Conforme houve o aumento da dose, maior foi o prejuízo. Destaca-se a cultivar NS7007, que apresentou os resultados mais evidentes de toxicidade pelo Cd, para esta variável.

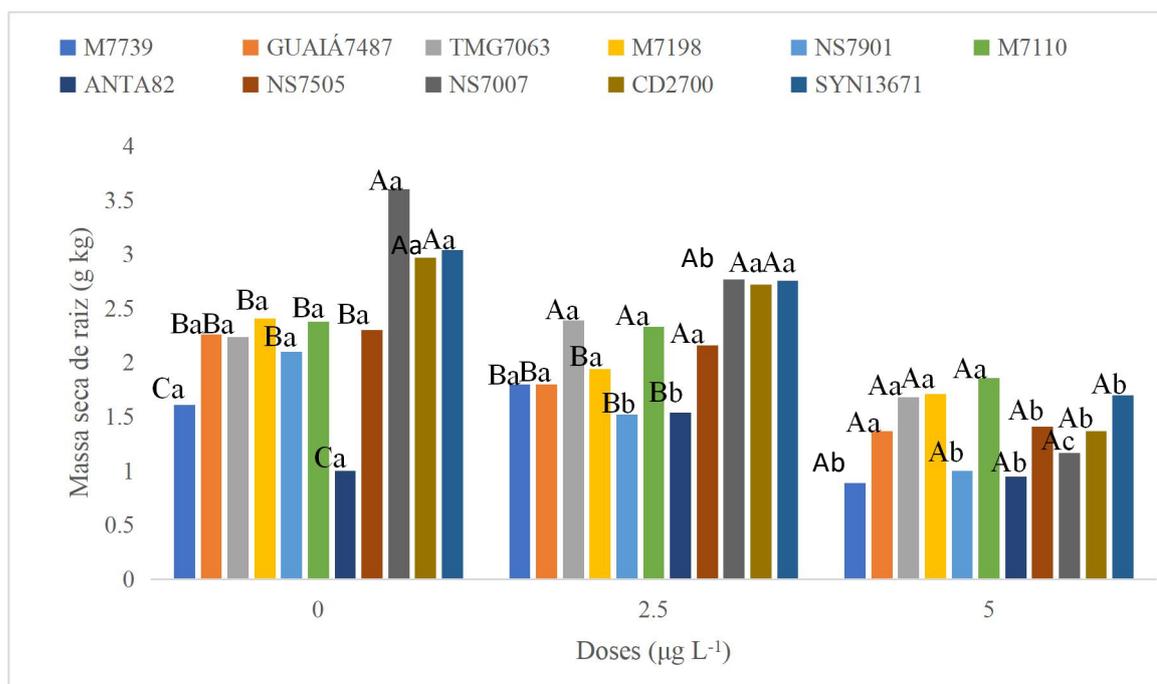


Figura 10 - Médias de massa seca de raiz (MSR) (g kg) de onze cultivares de soja, de diferentes ciclos de maturação, em relação a doses de Cd ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ). Letras maiúsculas comparam todas as cultivares dentro da mesma dose e letras minúsculas comparam cada cultivar isolada nas três doses.

A diminuição da produção de massa de matéria seca já foi observada por Shah e Dubey (1995) que, ao estudarem o efeito do Cd em arroz, observaram que este elemento provocou diminuição no crescimento das raízes e parte aérea pelas alterações na atividade do RNA, afetando assim a divisão celular.

Outros autores ressaltam que a redução no crescimento e desenvolvimento vegetal causada pelo Cd deve-se à inibição de processos fisiológicos importantes, tais como a fotossíntese e a respiração (BENAVIDES et al., 2005).

Baseado nos parâmetros biométricos iniciais das 11 cultivares testadas, é importante ressaltar as cultivares GUAÍÁ7487, M7110 e ANTA82 (com grupos de maturação médio, precoce e médio respectivamente), como sendo as cultivares com melhores desempenhos, independente da dose de Cd aplicada. Já a cultivar SYN13671 (Ciclo médio) foi aquela que apresentou o pior desempenho nos parâmetros avaliados; dentre os 6 parâmetros métricos, apresentou os piores resultados em 5 deles. Observa-se que o efeito do Cd foi mais evidente,

principalmente na dose de 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$ , pois em todos os parâmetros avaliados houve diferença significativa.

Para a análise de componentes principais (PCA), foram realizadas duas formas de análise dos dados, onde na primeira foram utilizados os resultados de cada cultivar nas três doses de Cd, 0,0 2,5 e 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$  (Figuras 11 e 12). Porém, em ambos os formatos, os parâmetros que foram avaliados permaneceram agrupados nos componentes em graus positivos, o que representa que os parâmetros estão seguindo os padrões de coerência dos dados, apresentando significância.

No primeiro formato empregado (Figura 11) não foi possível obter resultados visíveis, pois houveram muitas diferenças significativas entre as doses de Cd. Cada cultivar avaliada apresentou padrões próprios em relação à presença de Cd, desta maneira, dificultando o agrupamento das variáveis avaliadas.

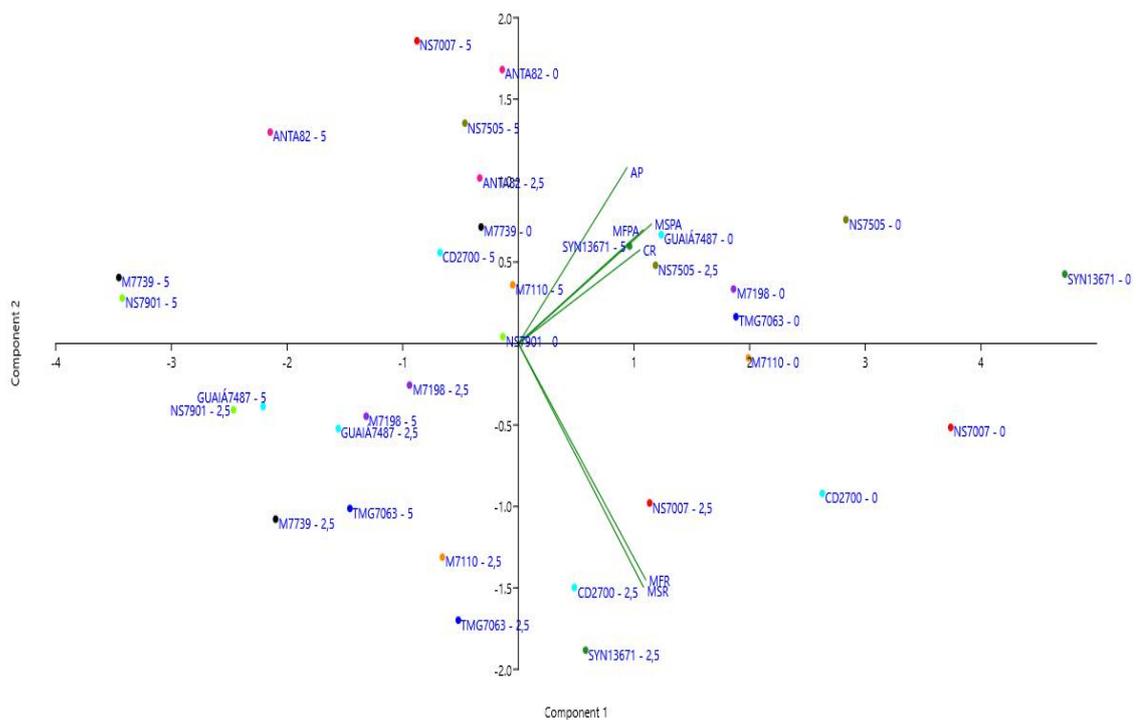


Figura 11 - Análise de componentes principais (PCA) de onze cultivares de soja, com diferentes ciclos de maturação, expostas a doses de Cd (0,0 2,5 e 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ ).

Para o segundo formato de análise de componentes principais (PCA), foram utilizados as 11 cultivares agrupadas por cada dose de Cd (Figura 12). Foi possível realizar o agrupamento nos componentes, podendo assim se definir os melhores e os piores grupos de cultivares nas determinadas doses. As cores pretas correspondem ao grupo de cultivares de

doses 0,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ , as cultivares com cor rosa correspondem às de doses 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$  e, por fim, as cultivares de cor verde correspondem ao grupo de cultivares de dose 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ .

É possível visualizar que as cultivares de dose 0,0  $\mu\text{g L}^{-1}$  apresentaram comportamentos semelhantes, agrupando-se, em sua maioria, nas partes positivas dos componentes 1 e 2, que variam de 0 a 2,0 positivo. Conforme a PCA, é possível visualizar a tendência das cultivares em relação aos parâmetros principais.

Na dose de 2,5  $\mu\text{g L}^{-1}$ , não é possível visualizar agrupamento, pois houve efeito deletério da presença do Cd. Os prejuízos fizeram com que as cultivares se fixassem tanto nos componentes 1 quanto 2, porém variando em graus positivos e negativos.

E para a dose de 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ , as cultivares também sofreram prejuízos conforme a dose aplicada, variando entre os componentes 1 e 2 e permanecendo, em sua maioria, no componente 2 na área negativa, com variações e, quando observa-se o componente 1, em área positiva. Houve médio agrupamento das cultivares.

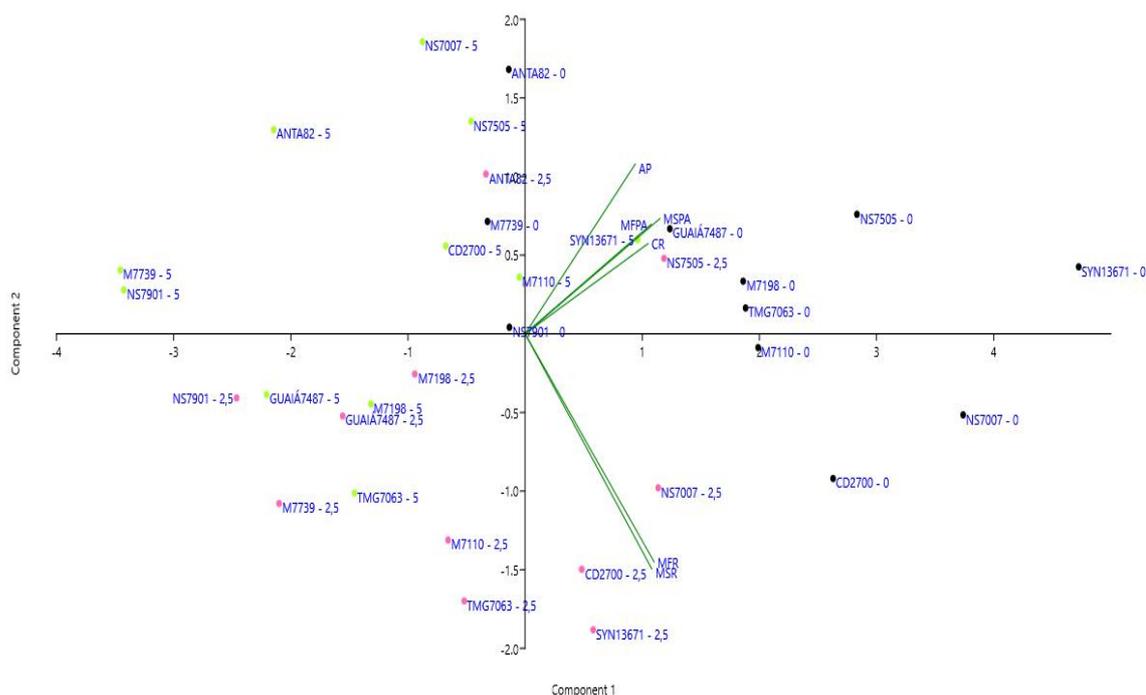


Figura 12 - Análise de componentes principais (PCA) das 11 cultivares agrupadas por doses, 0,0 2,5 e 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ .

Fadigas et al. (2002), após realizar PCA, também identificaram correlação significativa entre teor total de Cd e Fe, teor de argila, baixa correlação entre o metal e o pH, trabalhando com amostras superficiais compostas principalmente de Latossolos e Argissolos.

De maneira semelhante, outros trabalhos já demonstraram esta alta relação entre Cd e Fe (FADIGAS et al., 2010), Pb (ANJU e BANERJEE, 2011) e Zn (ARAVIND e PRASAD, 2005) em solos.

Paiva et al. (2004) ressaltaram que a resposta de diversas espécies submetidas a ambientes contaminados por Cd é muito variável, sendo necessário testar o comportamento individual de cada espécie face à contaminação. Lopez-Millan et al. (2009) explicam que diferenças entre as espécies podem surgir de diferentes homeostases de micronutrientes e mecanismos de desintoxicação de Cd.

Estudos realizados por Cannata et al. (2013) demonstraram que concentrações de Cd até  $1,0 \text{ mg L}^{-1}$  se mostraram inofensivas a algumas plantas como o rabanete. Segundo Gallego et al. (2012), as plantas utilizam várias estratégias para neutralizar o efeito inibidor do Cd. Pensa-se que a administração de nutrientes competitivos com o Cd é uma possível maneira de superar a sua toxicidade.

Todos os aspectos podem variar de acordo com a concentração de cádmio fornecido, a espécie envolvida e também o tempo com que este permanece exposto (BERNAVIDES, FALLEGO e TOMARO, 2005). Contudo, fica visível a importância de se estudar o elemento cádmio, pois em todos os parâmetros que foram avaliados, foi verificado prejuízos às cultivares, desde a germinação até os parâmetros métricos. São necessários outros estudos para fechamento das ideias que foram levantadas neste trabalho, pois as comparações dos dados foram feitas com base em trabalhos realizados em outras plantas, devido à falta de informações na cultura da soja.

#### **4 CONCLUSÕES**

A presença do elemento traço Cd afetou a germinação das cultivares de soja, sendo a dose  $2,5 \mu\text{g L}^{-1}$  a que apresentou as maiores influências.

Cultivares de ciclo de maturação tardio sofrem efeito na dose maior  $5 \mu\text{g L}^{-1}$  de Cd, enquanto nas de ciclo precoce e médio isto ocorreu na dose  $2,5 \mu\text{g L}^{-1}$  do elemento.

A cultivar SYN 13671 foi a que apresentou os maiores prejuízos no desenvolvimento devido à exposição ao Cd.

As cultivares sem exposição ao Cd apresentaram melhor desenvolvimento biométrico quando comparadas com a situação de exposição ao cádmio.

## REFERÊNCIAS

AN, Y. J. Soil ecotoxicity assessment using cadmium sensitive plants. **Environmental Pollution**, v.127, p. 21–26. 2004.

ANJU, M.; BANERJEE, D. K. Associations of cadmium, zinc and lead in soils from a lead and zinc mining area as studied by single and sequential extractions. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 176, p. 67-85. 2011.

ARAVIND, P.; PRASAD, M.N.V. Cadmium-zinc interactions in a hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L.: adaptative ecophysiology, biochemistry and molecular toxicology. **Brazilian Journal of Plant Physiology**. v. 17, n. 1, p. 3-20, 2005.

BAKER, D. E. & CHESNIN, L. Chemical monitoring of soils for environmental quality and animal and human health. **Adv. Agron.**, New York, 27, 1975.

BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Respuestas de las plantas a la contaminación por metales pesados. *Suelo y Planta*, Madrid, v.2, p.345-361, 1992.

BENAVIDES, M. P.; GALLEGOS, S. M.; TOMARO, M. L. Cadmium toxicity in plants. **Brazilian Journal Plants Physiology**, v. 7, n. 1, p.21-34, 2005.

BIONDI, C. M. Teores naturais de metais pesados nos solos de referência do Estado de Pernambuco. 2010. 70f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para Análise de Sementes. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, DF: Mapa/ACS, 2009. 398p.

CAMPOS, M.L. et al. Determinação de cádmio, cobre, cromo, níquel, chumbo e zinco em fosfatos de rocha. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília (DF), v.40, p.361-367, 2005.

CANNATA, M.G.; Carvalho, R.; Bertoli, A.C.; Bastos, A.R.B.; Carvalho, J.G.; Freitas, M.P. e Augusto, M.S. (2013) - Effects of lead on the content, accumulation, and translocation of nutrients in bean plant cultivated in nutritive solution. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, vol. 44, n.5, p. 939-951.

CARDOSO, P. **Resposta de Linhagens de Arroz à Exposição ao Cádmio**. São Paulo: USP, 2000.

CEPEA – Centro de Pesquisas Avançadas em Economia Aplicada (Cepea), CNA – Confederação Nacional da Agricultura: Produto Interno Bruto do Agronegócio – Dados de 1994 a 2011.

CHAVES, L.H.G; ESTRELA, M.A AND SOUZA, R.S DE. 2011. Effect on plant growth and heavy metal accumulation by sunflower. **Journal Phytol.**, 3(12): 04-09.

CHUGH, L.K.; SAWHNEY, S.K. Effect of cadmium on germination, amylases and rate of respiration of germinating pea seeds. **Environmental Pollution**, London, v.92, p.1-5, 1996.

CONAMA. Resolução no 420, de 28/12/2009. In: **Resoluções do CONAMA**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2012. p. 899–915.

EMBRAPA SOJA, Centro Nacional de Pesquisa Soja. A Soja no Brasil. Disponível em: [www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/SojanoBrasil.htm](http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/SojanoBrasil.htm). Acesso em: 12 mai. 2015.

EMBRAPA SOJA. Recomendações técnicas para a cultura de soja na região central do Brasil 1999/2000. Londrina: 1999.226p. (Embrapa Soja. Documentos, 132. Embrapa Agropecuaria Oeste, 5).

FADIGAS, F. S.; SOBRINHO, N. M. B. A.; MAZUR, N.; ANJOS, L. H. C.; FREIXO, A. A. Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. **Bragantia**, v. 61, n. 2, p. 151-159, 2002.

FADIGAS, F. S.; SOBRINHO, N. M. B. A; ANJOS, L. H. C.; MAZUR, N. Background levels of some trace elements in weathered soils from the Brazilian Northern region. **Scientia Agricola**, v.67, n.1, p.53-59, 2010.

FAGERIA, N.K.; ZIMMERMANN, F.I.P. & LOPES, A.M. Resposta do arroz irrigado à aplicação de fósforo, zinco e calcário. *R. Bras. Ci. Solo*, 1:72-76, 1977.

FERREIRA, D. F. Análise estatística por meio do SISVAR (Sistema para Análise de Variância). In: Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria, 45., 201100, São Carlos. Anais...São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.

FREITAS, Márcio de Campos Martins de. A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia Biosfera: Centro Científico Conhecer**, Goiânia/GO; v. 7, n.12, 2011.

GALLEGO, S. M.; Pena, L. B.; Barcia, R. A.; Azpilicueta, C. E.; Iannone, M. F.; Rosales, E. P. e Benavides, M. P. (2012) - Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms. **Environmental and Experimental Botany**, vol. 83, p. 33-46.

GALLI, U.; SCHUEPP, H.; BRUNOLD, C. Thiols in cadmium and copper-treated maize (*Zea mays L.*). **Planta**, v. 198, n.1, p. 139-143, 1996.

GONG, P.; WILKE, B. M.; STROZZI, E.; FLEISCHMANN, S. Evaluation and refinement of a continuous seed germination and early seedling growth test for the use in the ecotoxicological assessment of soils. **Chemosphere**, v. 44, p. 491-500. 2001.

GUILHERME, L.R.G.; MARQUES, J.J.G.S. M.; PIERANGELI, M.A.P.; ZULIANI, D.Q.; CAMPOS, M.L.; MARCHI, G. Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos. Tópicos em Ciência do solo, Viçosa, v. 4, p. 345-390, 2005.

HAMMER, Ø. PAleontological STatistics Version 3.15. Reference manual. Natural History Museum. **University of Oslo**; 253 p. 2017.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. Trace Elements in Soils and Plants. 3rd ed. CRC Press, London, 2000. p.123 – 167.

KATHEEB, W. Cadmium-Induced Changes in Germination, Seedlings Growth, and DNA Finger printing of in vitro Grown Cichorium pumilum Jacq. **International Journal of Biology**, v. 6; p.65-73, 2014.

KING, L.D. Soil heavy metals. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E. & FONTES, M.P. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Universidade Federal de Viçosa**, 1996. p.823-836.

KUPPER, H.; Kupper, F and Spiller, M. Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants. **Journal of Experimental Botany**. v. 47, n. 295, p. 259-266, 1996.

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

LAGRIFFOUL, A.; MOCQUOT, B.; VANGRONSVELD, J.; MENCH, M. Cadmium toxicity effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and activities of stress related enzymes in Young maize plants (*Zea mays L.*) **Plant and Soil**, v.200 p. 241-250, 1998.

LOPEZ-MILLAN, A.F.; Sagardoy, R.; Solanas, M.; Abadia, A. e Abadia, J. (2009) - Cadmium toxicity in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants grown in hydroponics. **Environmental and Experimental Botany**, vol. 65, n. 2-3, p. 376-385.

LÖSCH, R. Plant mitochondrial respiration under the influence of heavy metals. In: PRASAD, M.N.V. (Ed.). Heavy metal stress in plants: From biomolecules to ecosystems. 2nd ed. Springer, printed in India, 2004. p.182-200.

LUAN, Z.Q.; CAO, H.C., YAN, B.X. Individual and combined phytotoxic effects of cadmium, lead and arsenic on soybean in Phaeozem. **Plant Soil and Environment**, v. 54, n. 9, p. 403-411, 2008.

LUX, A; MARTINKA, M; VACULÍK, M AND WHITE, P.J. 2010. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review. **Journal Exp. Bot.**, 1-17.

MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: **Editora Agronômica Ceres**, 2006. 631p.

MATSUDA, A.; MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. Tolerância de rizóbios de diferentes procedências ao zinco, cobre e cádmio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, n. 3, p. 343-355, 2002.

MELLENDEZ, L. B. et al. Determination of Metallothioneins and Phytochelatins using HPLC/ICPMS. **Revista Virtual de Química**, v. 4, n. 6, p.612-622, 2012.

MUÑOZ, S. I. S. Impacto ambiental na área do aterro sanitário e incinerador de resíduos sólidos de Ribeirão Preto, SP: avaliação dos níveis de metais pesados. 2002. 131 f. (Doutorado em Enfermagem) - Programa de Pós-graduação em Enfermagem em Saúde Pública da Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto - SP, 2002.

MUNZUROGLU, O.; GECKIL, H. Effects of metals on Seed Germination, Root Elongation, and Coleoptile and Hypocotyl Growth in *Triticum aestivum* and *Cucumis sativus*. **Archives of Environmental Contamination Toxicology**, v. 43, p. 203-213, 2002.

NASCIMENTO, C; PEREIRA, J. Absorção e distribuição de cádmio e micronutrientes em cultivares de feijoeiro expostas a concentrações de cádmio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, p. 1303-1308, 1997.

OLIVEIRA, L. F. C.; LEMKE-DE-CASTRO, M. L.; RODRIGUES, C.; BORGES, J. D. Isotermas de sorção de metais pesados em solos do cerrado de Goiás. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, p. 776-782, 2010.

PAIVA, H.N.; Carvalho, J.G.; Siqueira, J. O.; Miranda, J.R.P. e Fernandes, A.R. (2004) - Nutrients absorption by seedlings of ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) in nutrient solution contaminated by cadmium. **Revista Árvore**, vol. 28, n. 2, p. 189-197.

PAL, M., E. HORVATH, T. JANDA, E. PALDI AND SZALAI, G 2006. Physiological changes and defense mechanisms induced by cadmium stress in maize. **J. Plant Nutr. Soil Sci.**, 169: 239-246.

PAVAN, M. A.; Miyazawa, M.; Análises Químicas de Solo: Parâmetros para Interpretação; (Circular Técnica, 91); **IAPAR**; Londrina, 1996.

PELOZATO, M. Valores de referência de cádmio, cobre, manganês e zinco para os solos de Santa Catarina. 2008. 64p. Dissertação (Mestrado em solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

PERALTA-VIDEA, J.R.; LOPEZ, M.L.; NARAYAN, M.; SUAPE, G.; GARDEA-TORRESDEY, J. The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain. **International Journal of Biochemistry and Cell Biology**, New York, v. 41, p. 1665-1677, 2009.

ROVEDA, L. F.; CUQUEL, F. L.; MOTTA, A. C. V.; MELO, V. F. Composto orgânico com altos teores de níquel e sua biodisponibilidade no sistema solo planta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 819-825, 2014.

SAEFL - Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape - SAEFL. Critical loads of acidity for forest soils – Regional-ized PROFILE model. Bern, 1998.102p. (Environmental Documentation Air/Forest, 88).

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

SHAH, K.; DUBEY, R. S. Effect of cadmium on RNA level as well as activity and molecular forms of ribonuclease in growing rice seedling. **Plant Physiology Biochemistry**, v. 33, n.5, p.577-584, 1995.

SHAW, B. P.; SAHU, S. K.; MISHRA, R. K. Heavy metal induced oxidative damage in terrestrial plants. In: PRASAD, M. N.V. (Ed). Heavy metal stress in plants: from biomolecules to ecosystems. New Delhi: Springer, 2004.

SILVA, André Felipe Moreira. Seletividade de herbicidas aplicados de forma isolada e associada em soja RR/STS. 2015. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2015.

SOUZA, J. F. **Efeito de metais pesados no desenvolvimento de plântulas de milho (*Zea mays* L.) e rabanete (*Raphanus sativus* L.)**. 2003. 138p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2003.

VIRGA, R. H. P.; GERALDO, L. P.; SANTOS, F. H. Avaliação de contaminação por metais pesados em amostra de siris azuis. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 27, p. 779-785, 2007.

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

## CAPÍTULO 2

### PRESENÇA DE CÁDMIO E SEUS EFEITOS NO CRESCIMENTO E NA FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA *a* EM SOJA

#### RESUMO

Objetivou-se avaliar os efeitos de doses de cádmio (Cd) no crescimento e na fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, sendo as unidades experimentais compostas por vasos Leonard com cultivo de soja (M7110 IPRO). O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado (DIC) com 5 repetições. As doses de cádmio de 0; 1; 2; 4; 8 e 16 mg L<sup>-1</sup>, foram adicionadas em solução nutritiva de Hoagland. Quando as plantas atingiram o estágio fenológico R1 (florescimento), foram realizadas as avaliações das características: altura de parte aérea (APA), volume de raiz (VR), massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR), massa seca de nódulos (MSN), número de nódulos (NN), índice de clorofila, fluorescência, N total da parte aérea e de raízes e teor de Cd na parte aérea e raízes. Os resultados obtidos demonstram que o aumento das doses de Cd resultaram em redução das características biométricas avaliadas, caracterizando prejuízos para a soja. Nos parâmetros bioquímicos, os resultados que apresentaram os valores mais expressivos foram o cádmio na parte aérea e nas raízes, o aumento das doses resultou em maiores teores de Cd tanto em parte aérea como nas raízes. Para os parâmetros de fluorescência, os resultados foram significativos no terço superior da soja: Fm/FO; Fv/FO; Fm/Fv; Phi\_PO. Para o N total, quanto maior a dose menores foram os valores de N. Conclui-se que as doses de cádmio afetaram negativamente os parâmetros massa seca e número de nódulos (MSN e NN), massa seca de parte aérea e de raiz (MSPA e MSR), N total raiz, teor de cádmio nas partes aéreas e de raiz, Clorofila, altura de parte aérea (APA), Fm/FO, Fv/FO, Fm/Fv e Phi\_PO em terços superiores e não influenciaram o volume de raiz (VR), N total da parte aérea, Fm/FO, Fv/FO, Fm/Fv e Phi\_PO nos terços médios.

**Palavras-chave:** Poluente, Fluorescência, *Glycine max L.*

## CHAPTER 2

### PRESENCE OF CADMIO AND ITS EFFECTS ON GROWTH AND FLUORESCENCE OF CHLOROPHYLL a IN SOY

#### ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effects of cadmium (Cd) doses on growth and biological nitrogen fixation in soybean culture. The experiment was conducted in a greenhouse, with the experimental units composed of Leonard pots with soybean cultivation (M7110 IPRO). The experimental design adopted was entirely randomized (DIC) with 5 replications. Cadmium doses of 0; 1; 2; 4; 8 and 16 mg L<sup>-1</sup>, were added in Hoagland's nutrient solution. When the plants reached the phenological stage R1 (flowering), the evaluations of the characteristics were carried out: height of aerial part (APA), root volume (VR), dry mass of aerial part (MSPA) and dry mass of root (MSR), dry mass of nodules (MSN), number of nodules (NN), chlorophyll index, fluorescence, total N of the aerial part and roots and Cd content in the aerial part and roots. The results obtained demonstrate that the increase in Cd doses resulted in a reduction in the biometric characteristics evaluated, characterizing losses for soybeans. In the biochemical parameters, the results that presented the most expressive values were the cadmium in the aerial part and in the roots, the increase of the doses resulted in higher Cd contents both in the aerial part and in the roots. For the fluorescence parameters, the results were significant in the upper third of the soybean: Fm / FO; Fv / FO; Fm / Fv; Phi\_PO. For the total N, the higher the dose, the lower the N values. It was concluded that cadmium doses negatively affected the parameters dry mass and number of nodules (MSN and NN), dry mass of aerial part and root (MSPA and MSR), total root N, cadmium content in aerial and root parts, Chlorophyll, aerial height (APA), Fm / FO, Fv / FO, Fm / Fv and Phi\_PO in upper thirds, and did not influence, the root volume (VR), total N of the aerial part, Fm / FO, Fv / FO, Fm / Fv and Phi\_PO in the middle thirds.

**Key words:** Pollutant, Fluorescence, *Glycine max L.*

## 1 INTRODUÇÃO

O cultivo da soja (*Glycine max* L.) é uma atividade extremamente importante para a economia brasileira e responsável por milhões de empregos diretos e indiretos. Com relação à fertilização dessa cultura, os micronutrientes exercem funções importantes e um dos meios para manter a produtividade de grãos é a correção da fertilidade e o manejo adequado do solo (OLIVEIRA et al., 2001; GONÇALVES JR.; PESSOA, 2002).

Na safra 2018/19, foram produzidas no Brasil 360 milhões de toneladas de soja CONAB (2019). Além do lucro direto gerado pela venda, sua cadeia produtiva impacta diretamente no mercado de insumos, máquinas, assistência técnica, gerando empregos diretos e indiretos (MAPA, 2018). A soja é a cultura agrícola que mais cresceu nas últimas três décadas e corresponde a 49% da área cultivada em grãos no país (MAPA, 2018).

A obtenção de elevados rendimentos da soja é em função dos altos custos de produção e da crescente competitividade de todos os produtores. No entanto, a obtenção e, mais importante, a manutenção de elevados rendimentos são resultados de uma complexa interação de fatores de clima, planta, solo e manejo (AMADO et al., 2010).

A contaminação do solo tem sido uma situação comum em todo o mundo (STOKES et al., 2006; GATIBONI et al., 2015) sendo um dos principais fatores que tem influenciado negativamente a qualidade do solo e o desenvolvimento das plantas, por exemplo, a fertirrigação das culturas, que, se usada incorretamente, pode constituir impacto ambiental.

Os elementos traço (ETs), estão entre os contaminantes ambientais mais comuns e seu comportamento merece destaque, por serem tóxicos e permanecerem longos períodos no ambiente, representando ameaça potencial à biodiversidade, bem como aos ecossistemas terrestres e aquáticos (OLIVEIRA, 2011).

O cádmio (Cd) é um ET potencialmente tóxico a diferentes espécies da biota e humanos, acarretando sérios danos ao funcionamento e biodiversidade do ecossistema e à saúde pública (ALLOWAY; AYERS, 1996; MELVILLE; BURCHETT, 2002; ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000; VINODHINI; NARAYANAN, 2008).

Dentre os ETs, o Cd é considerado um dos principais contaminantes do ambiente e um dos mais tóxicos (CHEN; KAO, 1995). Este poluente pode afetar as plantas em muitos aspectos: germinação, crescimento, nutrição, fisiologia, etc. Lee; Leustek (1999) sugerem que a presença de altos teores de Cd pode impedir o acúmulo de enzimas necessárias para a desintoxicação das plantas.

Além disso, o Cd pode alterar a absorção de nutrientes pelas plantas, afetar a abertura estomática, a transpiração, a fotossíntese, a permeabilidade da membrana plasmática, a translocação do floema, interferir na absorção, no transporte e uso de Ca, Mg, P, K e água. Todos estes efeitos da fitotoxicidade ao Cd podem aparecer mesmo quando as concentrações forem baixas (BENAVIDES et al., 2005; PRESTON et al. 2014).

Segundo Poschenrieder et al. (1989) o crescimento de plantas superiores em substrato contendo Cd mostrou distúrbios no balanço hídrico, afetando a elasticidade da parede celular e inibindo a expansão celular. A redução da biomassa é efeito direto de todas essas transformações sofridas mediante exposição ao Cd. O estágio da germinação dentro do ciclo de vida da planta é bem protegido contra estresses. Porém, após a inibição de processos de desenvolvimento vegetativos subsequentes, as plantas tornam-se, em geral, sensíveis ao estresse por elementos traço (Ets) (LI et al., 2005).

Peralta et al. (2001) afirmaram que doses altas de Cd podem causar desordens metabólicas e inibição da germinação em várias espécies. Munzuroglu; Geckil (2002) afirmaram também que o Cd reduziu a germinação de sementes de lentilha, mostarda e arroz.

Portanto, o estudo do elemento cádmio na cultura da soja se torna de extrema importância, pelo fato de ser uma das culturas mais cultivadas no mundo e o Cd apresentar alta taxa de toxicidade em plantas. E dentro deste cenário, objetivou-se avaliar os efeitos de doses de cádmio no crescimento e na fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Universidade de Rio Verde (UniRV), coordenadas 17°47'18"S 50°57'31"W, com clima do tipo Aw. 23,3°C, altitude 739 m. Foi semeada a cultivar de soja M7110 IPRO, em vasos tipo Leonard (Figura 13), onde na parte superior usou-se 1,34 kg de areia 1:1 (areia fina e grossa), previamente lavada e peneirada, para evitar possíveis contaminações. A parte de baixo dos vasos foi utilizada para fornecimento de água, nutrientes e exposição das plantas ao Cd, conforme descrição abaixo.

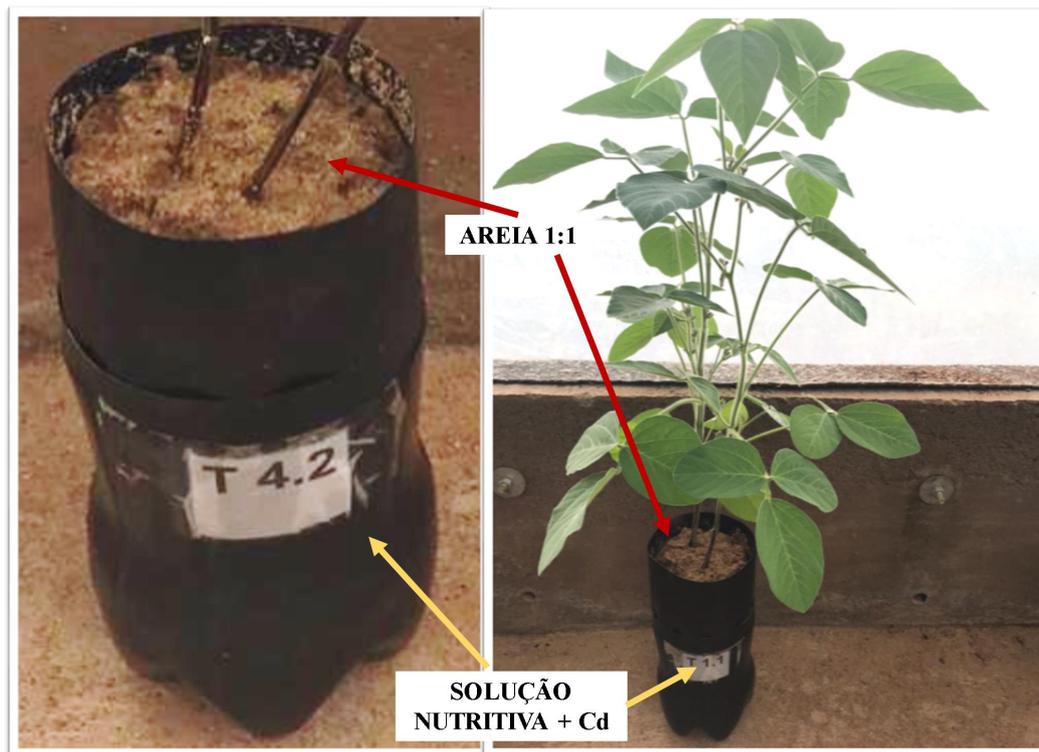


Figura 13 - Vasos Leonard utilizados no experimento.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC), onde adotou-se, como fonte de variação, doses de 0; 1; 2; 4; 8 e 16 mg L<sup>-1</sup> de cádmio. Cada tratamento apresentou 5 repetições. Para a determinação das doses, foi levado em consideração o teor máximo do elemento na solução do solo (CONAMA, 2012), sendo esta a menor dose utilizada do ET.

A semeadura de quatro sementes de soja por vaso foi realizada no dia 24/10/2019. Antes da semeadura, as sementes foram inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium japonicum* (de acordo com as recomendações do produto comercial) para garantir o suprimento adequado de nitrogênio (N) via fixação biológica (FBN) para a cultura. No dia 01/11/2019 foi realizado o desbaste, deixando-se duas plantas por vaso. Durante os primeiros dias de condução do experimento, o suprimento de nutrientes para a soja ocorreu por meio da solução nutritiva de Hoagland (Tabela 1), isenta de Cd e de N, preparada com água deionizada, força iônica de 100% e cerca de 300 mL por vaso. A reposição da solução nutritiva acontecia uma vez por semana, conforme a necessidade da cultura e a evapotranspiração. A adição do poluente CdCl<sub>2</sub>, cloreto de cádmio, nas doses já mencionadas, à solução nutritiva com as plântulas de soja ocorreu no dia 05/11/2019.

Tabela 1 - Composição química dos nutrientes presentes na solução nutritiva de Hoagland & Arnon (1950)

<b>Hoagland &amp; Arnon (1950)</b>			
-----mg L <sup>-1</sup> de solução nutritiva-----		-----µg L <sup>-1</sup> de solução nutritiva-----	
		B	500
P	31,0	Cu	20
K	234,6	Fe	5022
Ca	200,4	Mn	502
Mg	48,6	Mo	11
S	64,2	Zn	50

Quando as plantas atingiram o estágio fenológico R1 (florescimento), foram realizadas avaliações das características altura de parte aérea (APA), volume de raiz (VR), massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR), massa seca de nódulos (MSN), número de nódulos (NN), índice de clorofila (SPAD), fluorescência, N total da parte aérea e de raízes (TEDESCO, 1985).

A fluorescência da clorofila a foi determinada em folhas adaptadas ao escuro por 30 minutos, utilizando a função O-J-I-P para avaliação da fluorescência transiente rápida por meio de um fluorômetro portátil (FluorPen FP 100, Photon System Instruments, Czech Republic), com pulso de luz saturante de 3000 µmol (fótons) m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e luz actínica de 1000 µmol (fótons) m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, conforme Strasser et al., (2000) e as medições realizadas no terço médio e terço superior das plantas de soja. As quantificações de fluorescência foram Fm/Fo: fluorescência máxima por fluorescência inicial; Fv/Fo: tamanho e número de centros de reações; Fm/Fv: rendimento quântico fotoquímico primário e φPo: rendimento quântico máximo fotoquímico primário.

Os resultados obtidos foram submetidos a análise de variância (ANAVA) pelo programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2019). Quando houve significância, as médias foram submetidas ao ajuste de modelo de regressão.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 2 apresenta o resumo da análise de variância (ANAVA) das características avaliadas. Este evidencia que ocorreram diferentes respostas nos parâmetros biométricos, bioquímicos e de fluorescência da cultivar de soja M7110 - IPRO testada em função da

presença de cádmio no sistema. As variáveis massa seca de parte aérea (MSPA), massa seca de raiz (MSR), cádmio na parte aérea (Cd-PA), cádmio na raiz (Cd-R) apresentaram-se significativos a 1% de probabilidade.

Para as variáveis altura de parte aérea (APA), massa seca de nódulos (MSN), número de nódulos (NN), nitrogênio na raiz (N-R) houve significância ( $p < 0,05$ ), no entanto, o volume de raiz (VR), nitrogênio na parte aérea (N-PA) e temperatura foliar (TF), não variaram em função das doses.  $F_m/F_o F_v/F_o \Phi \Phi$ .

Na figura 14 para APA, MSPA, MSR, MSN, NN foi possível observar a influência da presença de Cd no desempenho da soja, sendo que, quanto maior a dose de aplicação, menor o desenvolvimento da planta. Especificamente, para APA, a redução foi de 2,11 cm a cada dose de Cd aplicada, sendo assim, na ausência de Cd, as plantas apresentaram 44 cm de altura e na maior dose avaliada ( $16 \text{ mg L}^{-1}$ ) as plantas passaram para aproximadamente 33,45 cm.

A MSPA foi reduzida em 1,21 g a cada dose de Cd aplicada, o que resultou em uma redução de aproximadamente 6,05 g da parte aérea da soja comparada a MSPA da testemunha. Da mesma forma, a MSR reduziu 0,57 g a cada dose do poluente em que a soja foi exposta. A dose de  $16 \text{ mg L}^{-1}$  proporcionou a perda de 2,5 g de massa radicular da cultura.

No que se refere à nodulação, as equações de regressão mostraram que a cada dose de Cd aplicada na solução nutritiva obteve-se reduções na ordem de 0,24 g de MSN. Além disso, tal redução fez com que a soja deixasse de formar 15,05 nódulos. Em relação às perdas totais da nodulação, observou-se que a MSN passou de 1,95 g na testemunha para 0,75 g na maior dose testada e o número de nódulos foi reduzido de 160 para aproximadamente 84,55.

Dentre as avaliações fisiológicas, verificou-se significância ( $p < 0,05$ ) para o índice de clorofilas SPAD e para as seguintes variáveis da fluorescência: fluorescência inicial no terço médio ( $F_o \text{ TM}$ ), Intensidade de fluorescência em 30ms no terço médio ( $F_i \text{ TM}$ ), fluorescência máxima após adaptação ao escuro no terço médio ( $F_m \text{ TM}$ ), fluorescência variável no terço médio ( $F_v \text{ TM}$ ), fluorescência máxima por fluorescência inicial no terço superior ( $F_m/F_o \text{ TS}$ ), tamanho e número de centros de reações no terço superior ( $F_v/F_o \text{ TS}$ ), rendimento quântico fotoquímico primário no terço superior ( $F_v/F_m \text{ TS}$ ), rendimento quântico máximo fotoquímico primário no terço superior ( $\Phi \text{Po TS}$ ), rendimento quântico ( $t=0$ ) da energia de dissipação no terço superior ( $\Phi \text{Do TS}$ ), fluxo de absorção por centro de reação no terço médio ( $\text{ABS/RC TM}$ ), fluxo de energia armazenada por centro de reação no terço médio ( $\text{TRo/RC TM}$ ) e fluxo de dissipação de energia por centro de reação nos terços médios e superiores ( $\text{DIo/RC TM e TS}$ ).

Tabela 2 - Resumo da análise de variância de plantas de soja submetidas à diferentes doses de Cádmio (0; 1; 2; 4; 8 e 16 mg L<sup>-1</sup>) em ambiente controlado

FV <sup>1</sup>	GL <sup>2</sup>	APA <sup>3</sup>	VR <sup>4</sup>	MSPA <sup>5</sup>	MSR <sup>6</sup>	MSN <sup>7</sup>	NN <sup>8</sup>
Dose	5	4,89*	0,99 <sup>ns</sup>	6,53**	6,56**	5,53*	6,35*
Resíduo	24	-	-	-	-	-	-
Total	29	-	-	-	-	-	-
CV	-	11,34	14,04	33,97	36,29	41,40	21,89
FV	GL	Clorofila <sup>9</sup>	N-PA <sup>10</sup>	N-R <sup>11</sup>	Cd-PA <sup>12</sup>	Cd-R <sup>13</sup>	FO <sub>TM</sub> <sup>14</sup>
Dose	5	3,19*	2,03 <sup>ns</sup>	2,93*	16,40**	28,82**	3,12*
Resíduo	24	-	-	-	-	-	-
Total	29	-	-	-	-	-	-
CV	-	11,34	30,92	25,92	50,42	41,25	14,29
FV	GL	FO <sub>TS</sub> <sup>15</sup>	Fj <sub>TM</sub> <sup>16</sup>	Fj <sub>TS</sub> <sup>17</sup>	Fi <sub>TM</sub> <sup>18</sup>	Fi <sub>TS</sub> <sup>19</sup>	Fm <sub>TM</sub> <sup>20</sup>
Dose	5	2,19 <sup>ns</sup>	2,10 <sup>ns</sup>	0,39 <sup>ns</sup>	3,80*	0,89 <sup>ns</sup>	2,97*
Resíduo	24	-	-	-	-	-	-
Total	29	-	-	-	-	-	-
CV	-	6,32	12,02	7,59	10,32	7,78	7,19
FV	GL	Fm <sub>TS</sub> <sup>21</sup>	Fv <sub>TM</sub> <sup>22</sup>	Fv <sub>TS</sub> <sup>23</sup>	Fm/FO <sub>TM</sub> <sup>24</sup>	Fm/FO <sub>TS</sub> <sup>25</sup>	Fv/FO <sub>TM</sub> <sup>26</sup>
Dose	5	0,31 <sup>ns</sup>	2,77*	0,36 <sup>ns</sup>	1,70 <sup>ns</sup>	3,78*	1,71 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	-	-	-	-	-	-
Total	29	-	-	-	-	-	-
CV	-	5,76	6,91	6,04	7,74	4,39	9,23
FV	GL	Fv/FO <sub>TS</sub> <sup>27</sup>	Fm/Fv <sub>TM</sub> <sup>28</sup>	Fm/Fv <sub>TS</sub> <sup>29</sup>	Phi <sub>PO<sub>TM</sub></sub> <sup>30</sup>	Phi <sub>PO<sub>TS</sub></sub> <sup>31</sup>	Psi <sub>O<sub>TM</sub></sub> <sup>32</sup>
Dose	-	3,78*	1,69 <sup>ns</sup>	3,57*	1,69 <sup>ns</sup>	3,57*	1,22 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	-	-	-	-	-	-
Total	29	-	-	-	-	-	-
CV	-	5,20	1,53	0,87	1,53	0,87	6,19
FV	GL	Psi <sub>O<sub>TS</sub></sub> <sup>33</sup>	Phi <sub>EO<sub>TM</sub></sub> <sup>34</sup>	Phi <sub>EO<sub>TS</sub></sub> <sup>35</sup>	Phi <sub>DO<sub>TM</sub></sub> <sup>36</sup>	Phi <sub>DO<sub>TS</sub></sub> <sup>37</sup>	Phi <sub>Pav<sub>TM</sub></sub> <sup>38</sup>
Dose	5	0,64 <sup>ns</sup>	1,36 <sup>ns</sup>	1,05 <sup>ns</sup>	1,69 <sup>ns</sup>	3,57*	0,92 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	-	-	-	-	-	-
Total	29	-	-	-	-	-	-
CV	-	4,66	7,38	4,83	7,93	4,65	1,04
FV	GL	Phi <sub>Pav<sub>TS</sub></sub> <sup>39</sup>	ABS/RC <sub>TM</sub> <sup>40</sup>	ABS/RC <sub>TS</sub> <sup>41</sup>	TRO/RC <sub>TM</sub> <sup>42</sup>	TRO/RC <sub>TS</sub> <sup>43</sup>	ETO/RC <sub>TM</sub> <sup>44</sup>
Dose	5	0,22 <sup>ns</sup>	3,35*	2,12 <sup>ns</sup>	3,50*	1,79 <sup>ns</sup>	2,38 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	-	-	-	-	-	-
Total	29	-	-	-	-	-	-
CV	-	0,88	9,45	7,31	8,34	6,82	18,78
FV	GL	ETO/RC <sub>TS</sub> <sup>45</sup>	DLO/RC <sub>TM</sub> <sup>46</sup>	DLO/RC <sub>TS</sub> <sup>47</sup>			
Dose	5	1,07 <sup>ns</sup>	2,69*	3,21*			
Resíduo	24	-	-	-			
Total	29	-	-	-			
CV	-	8,20	8,20	10,80			

<sup>1</sup> fontes de variação, <sup>2</sup> grau de liberdade, <sup>3</sup> altura de parte aérea, <sup>4</sup> volume de raiz, <sup>5</sup> massa seca de parte aérea, <sup>6</sup> massa seca de raiz, <sup>7</sup> massa seca de nódulos, <sup>8</sup> número de nódulos, <sup>9</sup> clorofila, <sup>10</sup> nitrogênio total na parte aérea, <sup>11</sup> nitrogênio total nas raízes, <sup>12</sup> cádmio total na parte aérea, <sup>13</sup> cádmio total nas raízes, <sup>14</sup> fluorescência inicial no terço médio, <sup>15</sup> fluorescência inicial no terço superior, <sup>16</sup> intensidade de fluorescência em 2 ms no terço médio, <sup>17</sup> intensidade de fluorescência em 2 ms no terço superior, <sup>18</sup> intensidade de fluorescência em 30 ms no terço médio, <sup>19</sup> intensidade de fluorescência em 30 ms no terço superior, <sup>20</sup> fluorescência máxima após adaptação ao escuro no terço médio, <sup>21</sup> fluorescência máxima após adaptação ao escuro no terço superior, <sup>22</sup> fluorescência variável no terço médio, <sup>23</sup> fluorescência variável no terço superior, <sup>24</sup> fluorescência máxima por fluorescência inicial no terço médio, <sup>25</sup> fluorescência máxima por fluorescência inicial no terço superior, <sup>26</sup> tamanho e número de centros de reações no terço médio, <sup>27</sup> tamanho e número de centros de reações no terço superior, <sup>28</sup> rendimento quântico fotoquímico primário no terço médio, <sup>29</sup> rendimento quântico fotoquímico primário no terço superior, <sup>30</sup> rendimento quântico máximo fotoquímico primário no terço médio, <sup>31</sup> rendimento quântico máximo fotoquímico primário no terço superior, <sup>32</sup> eficiência quântica máxima do PSII no terço médio, <sup>33</sup> eficiência quântica máxima do PSII no terço superior, <sup>34</sup> rendimento quântico do transporte de elétrons no terço médio, <sup>35</sup> rendimento quântico do transporte de elétrons no terço superior, <sup>36</sup> rendimento quântico (t=0) da energia de dissipação no terço médio, <sup>37</sup> rendimento quântico (t=0) da energia de dissipação no terço superior, <sup>38</sup> rendimento quântico fotoquímico primário médio até tempo para fluor. máx. (tFM) no terço médio, <sup>39</sup> rendimento quântico fotoquímico primário médio até tempo para fluor. máx. (tFM) no terço superior, <sup>40</sup> fluxo de absorção por centro de reação no terço médio, <sup>41</sup> fluxo de absorção por centro de reação no terço superior, <sup>42</sup> fluxo de energia armazenada por centro de reação no terço médio, <sup>43</sup> fluxo de energia armazenada por centro de reação no terço superior, <sup>44</sup> fluxo de transporte de elétrons por centro de reação no terço médio, <sup>45</sup> fluxo de transporte de elétrons por centro de reação no terço superior, <sup>46</sup> fluxo de dissipação de energia por centro de reação no terço médio, <sup>47</sup> fluxo de dissipação de energia por centro de reação no terço superior, TM terço médio, TS terço superior, CV: coeficiente de variação, <sup>ns</sup> não significativo; \* significativo à 5%; \*\* significativo à 1%.

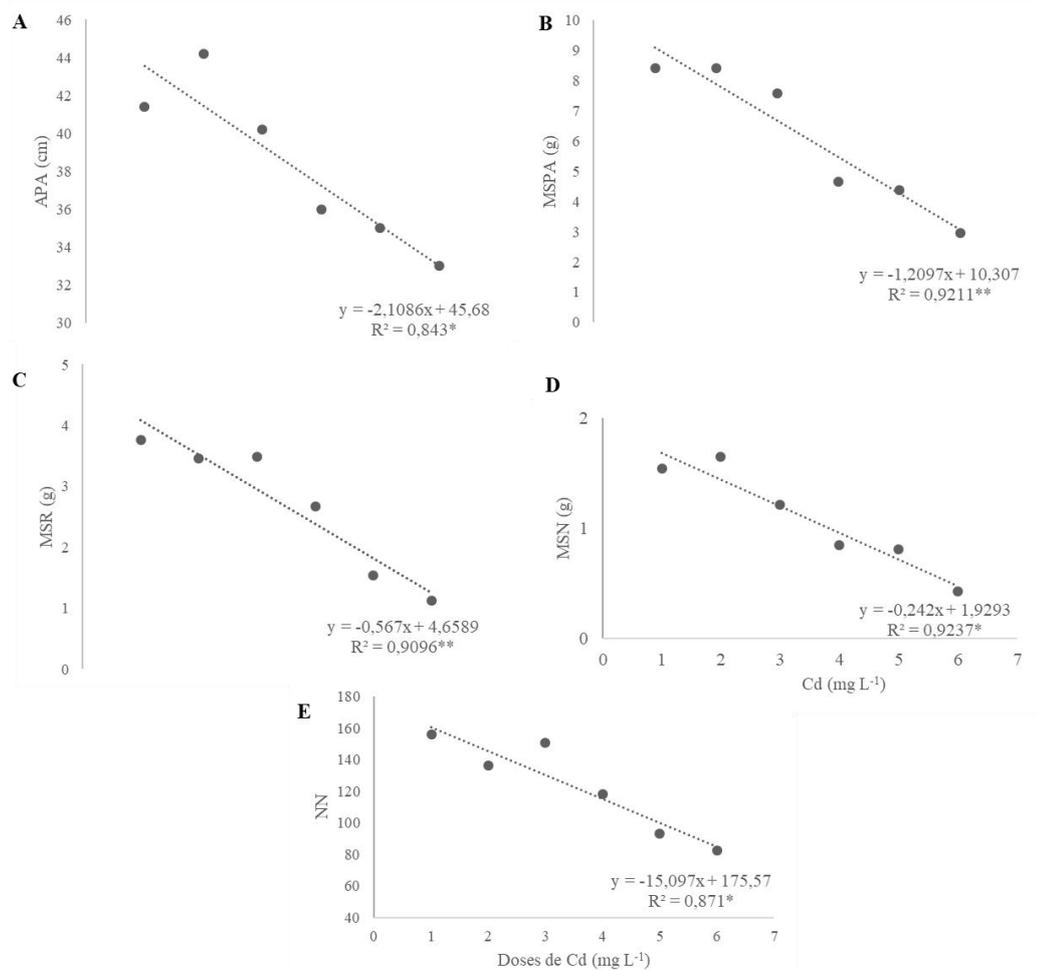


Figura 14 - Características biométricas da soja (M7110 – IPRO) submetida a doses de Cd. A: Altura da parte aérea; B: Massa seca da parte aérea; C: Massa seca de raiz; D: Massa seca de nódulos; E: Número de nódulos. \* Significativo a 5%; \*\* Significativo a 1%.

Os efeitos negativos do Cd nas plantas de soja também foram identificados por diagnose visual. As plantas de soja expostas ao cádmio (Cd) apresentaram como primeiro sintoma dos efeitos do poluente a necrose na base do pecíolo (Figura 15). Os efeitos visíveis da exposição à doses de metais pesados são descritos por redução do crescimento, clorose, atrofia foliar e raízes escurecidas. Para o caso do Cd, o enrolamento das folhas quando a concentração de Cd nos tecidos das plantas atinge valores entre 3 e 30 mg kg<sup>-1</sup>, os efeitos fitotóxicos são visíveis (BENAVIDES et al., 2005; CHEN et al. 2011).

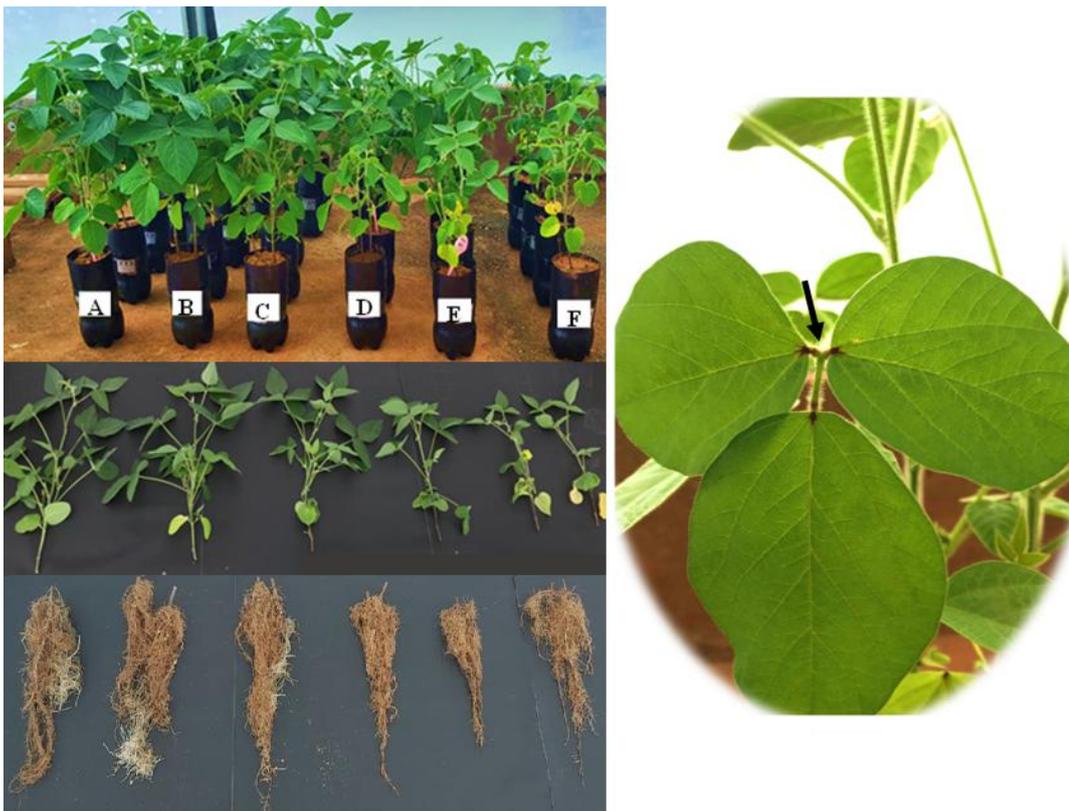


Figura 15 - Alturas de partes aéreas e comprimentos de raízes de plantas de soja submetidas à doses crescentes de cádmio. A: 0,0 mg L<sup>-1</sup> de Cd (testemunha), B: 1 mg L<sup>-1</sup>; C: 2 mg L<sup>-1</sup>; D: 4 mg L<sup>-1</sup>; E: 8 mg L<sup>-1</sup>; F: 16 mg L<sup>-1</sup> e primeiro sintoma expresso pela soja exposta ao cádmio.

As plantas submetidas às doses crescentes de Cd tiveram o seu crescimento afetado negativamente, sinalizando fitotoxicidade. A redução da APA (Figura 15) foi encontrada por outros pesquisadores. Uma das razões da redução da altura da planta, diâmetro caulinar e área foliar é a redução da taxa de fotossíntese, em função do efeito do cádmio nas plantas, devido à redução estomática (BARCELÓ E POSCHENRIEDER, 1990). A menor abertura estomática pode reduzir a disponibilidade de dióxido de carbono para a fotossíntese, acarretando a redução de taxas de crescimento.

Reduções no sistema radicular, neste caso MSR (Figura 15) também foram encontradas na literatura. Estudos com girassol mostram que o cádmio afeta negativamente o crescimento das plantas (CHAVES et al., 2011). Cupertino (2006) observou que na seringueira cultivada na presença de cádmio, houve inibição do crescimento da raiz e da parte aérea, redução na produção de massa seca em todos os órgãos da planta e quedas nas taxas de fotossíntese.

Para as características massa seca de parte aérea e de raiz (MSPA e MSR), os resultados foram inversamente proporcionais, assim como a massa seca de nódulos e número de nódulos (MSN e NN), onde houve tendência nos resultados, quanto maiores as doses de cádmio, maiores foram os prejuízos, ou seja, menores os resultados conforme o aumento das doses.

A diminuição de massa seca de parte aérea e raiz com o aumento das doses de cádmio é comumente encontrada na literatura. Katheeb et al. (2014), estudando os efeitos de cádmio em chicória anã, observaram que concentrações acima de 1600  $\mu\text{M}$  de cádmio levaram à diminuição da massa da matéria seca de raízes, bem como o crescimento radicular.

Esse comportamento também foi constatado em rúcula por Kamran et al. (2015). Fidalgo (2014) observou diminuição de biomassa de rúcula utilizando 5,63  $\text{mg kg}^{-1}$  de cádmio somente a partir do 48º dia e relaciona isso com o fato de este elemento diminuir a absorção, não só de alguns nutrientes, como também de água pela planta.

A nodulação foi afetada pela presença do Cd no sistema (Figura 16). Entretanto, existem trabalhos que apontam para resultados controversos. As estirpes de rizóbios de diferentes gêneros (*Bradyrhizobium*, *Rhizobium*, *Mesorhizobium* e *Sinorhizobium*), isoladas de solos tropicais, apresentam maior resistência ao cádmio (MATSUDA et al., 2002). Diferenças na resistência a metais pesados podem estar ligadas à procedência, mesmo quando pertencentes ao mesmo gênero ou, até, à mesma espécie.

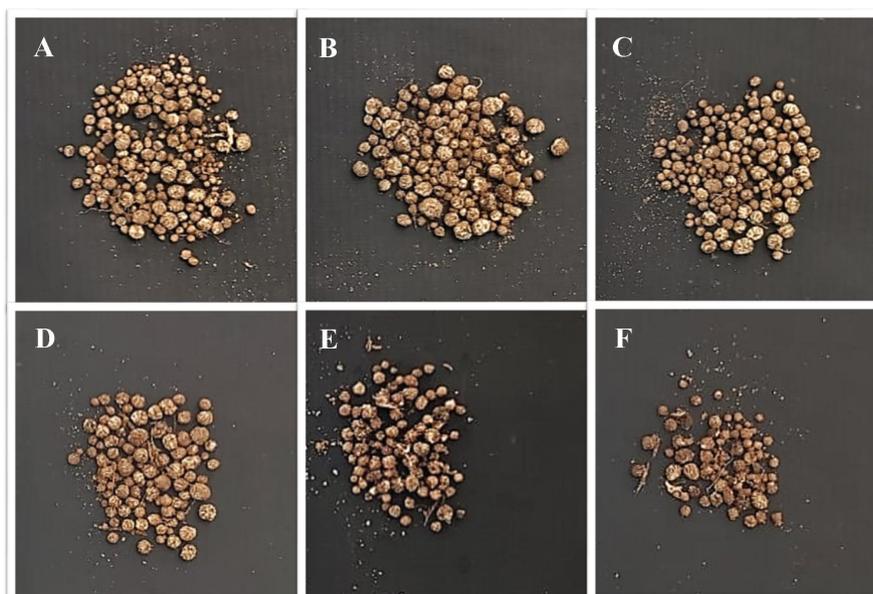


Figura 16 - Número de nódulos (NN) de plantas de soja submetidas à doses crescentes de cádmio. A: 0,0  $\text{mg L}^{-1}$  de Cd (testemunha), B: 1  $\text{mg L}^{-1}$ ; C: 2  $\text{mg L}^{-1}$ ; D: 4  $\text{mg L}^{-1}$ ; E: 8  $\text{mg L}^{-1}$ ; F: 16  $\text{mg L}^{-1}$ .

Bactérias dos gêneros *Rhizobium* e *Bradyrhizobium* foram identificadas em locais contaminados com metais tóxicos (SRIPRANG et al., 2002). A resistência de rizóbios a metais tóxicos pode ser atribuída a mudanças no efluxo do metal nas membranas celulares microbianas e transformação para formas menos tóxicas através do metabolismo microbiano (NIES, 2003).

O processo de nodulação nas plantas é um fenômeno complexo, depende de parâmetros do solo como características genéticas associadas ao rizóbio e o hospedeiro (AUNG et al., 2013). Correlações positivas e significativas entre a massa nodular e a quantidade de N fixado biologicamente já haviam sido relatadas por Döbereiner et al. (1966).

Na figura 17 são apresentados os gráficos de regressão de acordo com a análise estatística para as variáveis com características bioquímicas, clorofila, nitrogênio total na parte aérea (N-PA), nitrogênio total nas raízes (N-R), cádmio total na parte aérea (Cd-PA) e cádmio total na raiz (Cd-R). As características bioquímicas apresentaram comportamento linear, ou seja, quanto maiores as doses de Cd maiores foram os valores de clorofila. Os resultados para clorofila até a dose 2 mg L<sup>-1</sup> houve decréscimo e nas doses maiores a clorofila aumentou.

De acordo com as equações de regressão, a clorofila foi aumentada em aproximadamente 0,51 vezes a cada dose de Cd aplicada na soja. O nitrogênio total de raiz (N-R) foi reduzido em cerca de 0,06 g de nitrogênio por quilograma de raiz a cada dose de Cd aplicada. A dose de 16 mg L<sup>-1</sup> proporcionou uma perda de cerca de 0,47 g de nitrogênio total de raízes (N-R).

O que se refere ao cádmio nas partes aérea e de raízes (Cd-PA e Cd-R), as equações de regressão mostram que a cada dose de Cd aplicada na solução nutritiva, obteve-se aumentos nessas características. Em relação a isto, observou-se que o Cd-PA passou de 0,50 mg kg<sup>-1</sup> na testemunha para 17,54 mg kg<sup>-1</sup> na maior dose testada e, para Cd-R, o aumento foi de 1,37 mg kg<sup>-1</sup> para aproximadamente 81,53 mg kg<sup>-1</sup>.

A toxicidade do cádmio é um problema que afeta a produtividade das culturas em todo o mundo. A toxicidade do cádmio causa estresse em muitos processos fisiológicos da planta, incluindo o metabolismo do nitrogênio, fotossíntese, metabolismo de carboidratos, assimilação de minerais e as relações hídricas da planta (GAJDOS et al., 2012).

O decréscimo no teor de clorofila ocasionado pelo cádmio visualizado através do índice de SPAD pode diminuir a taxa fotossintética e a produção de sacarose, que é transportada para órgãos como raiz, caule e frutos. O Cd também pode afetar a abertura estomática, o que acarreta menor disponibilidade de carbono para a fotossíntese, ocasionando

redução das taxas de crescimento (GUIMARÃES et al., 2008). Sua toxicidade também desestrutura a molécula de clorofila, a qual é extremamente necessária para o funcionamento dos cloroplastos (MARSCHNER, 1995).

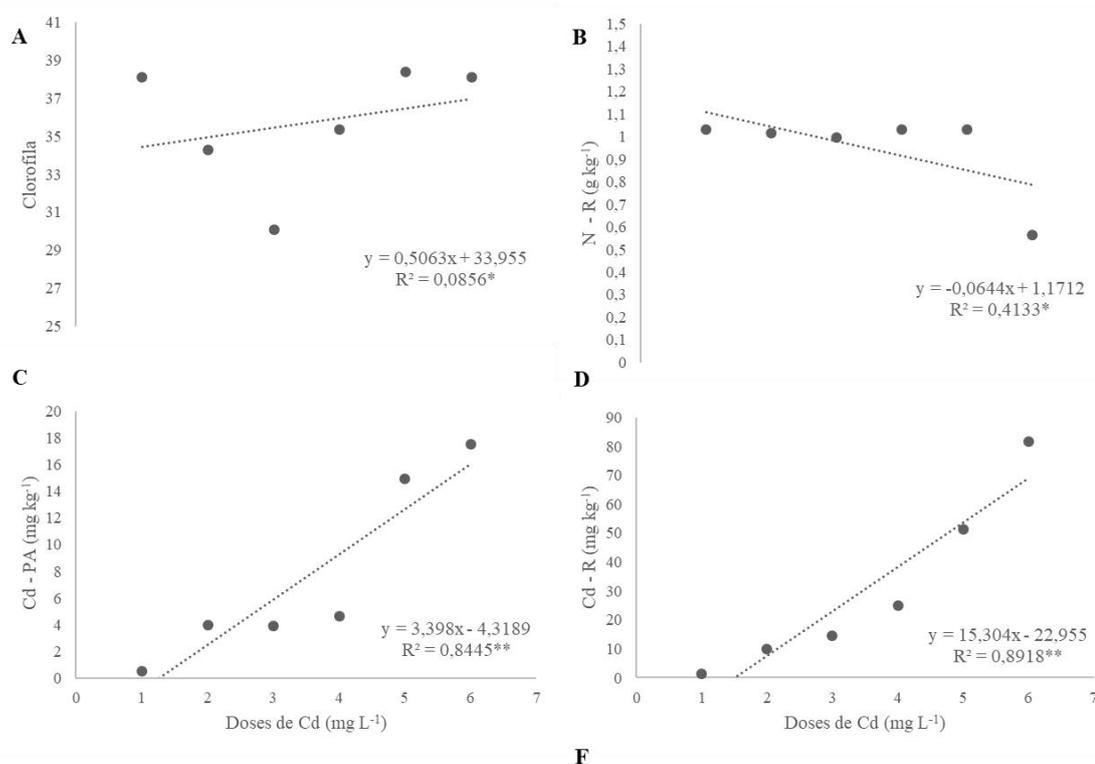


Figura 17 - Características bioquímicas da soja (M7110 – IPRO) submetida a doses de Cd. A: Clorofila; B: Nitrogênio na raiz; C: Cádmio na parte aérea; F: Cádmio na raiz. \* Significativo a 5%; \*\* Significativo a 1%; ns.

O conteúdo da clorofila das folhas representa uma característica apropriada na avaliação da aquisição de N pelas plantas, sob diferentes condições ambientais. Assim, a disponibilidade de N pode influenciar decisivamente na capacidade fotossintética das plantas (TAIZ; ZEIGER, 2008).

O metabolismo fotossintético é extremamente afetado pelo cádmio (IQBAL et al., 2010), tão importante quanto a fotossíntese, a assimilação de nitrogênio também é fortemente afetada por esse metal pesado (WAHID et al., 2007).

A diminuição no teor de N pode ser resultado de um mecanismo complexo de absorção do elemento pelas raízes e das sinergias e antagonismos de elementos como o potássio e o fósforo (CIECKO et al., 2004). O metabolismo do nitrogênio é importante na síntese de clorofila e é fundamental na resposta das plantas ao cádmio. O N aumenta a

polarização da membrana, o conteúdo de proteína, a troca de cátions e diminui a translocação do Cd (SARWAR et al., 2010).

Quanto ao cádmio na parte aérea e nas raízes, ambos apresentaram resultados significativos, conforme o aumento da dose aplicada, as quantidades expressas foram maiores, o que evidencia a toxicidade do elemento. O Cd é facilmente absorvido pelas raízes e chega ao xilema, onde é translocado para a parte aérea da planta por meio da transpiração (POVOVA et al., 2008). A alta concentração do metal nos tecidos afeta as membranas e proteínas, embora diversos processos fisiológicos, como a respiração, fotossíntese, transporte da água, absorção e uso de alguns nutrientes, também sejam afetados (ZHU et al., 2011).

O maior acúmulo de cádmio nas raízes parece ser resultado do contato direto das raízes com a solução nutritiva, da ligação do cádmio às cargas negativas das paredes celulares do sistema radicular em detrimento de uma maior absorção e posterior transferência para a parte aérea (GRANT *et al.*, 1998). Parte do cádmio absorvido é complexado na forma de fitoquelatinas e armazenado nos vacúolos das células das raízes (ZENK, 1997).

No estudo realizado por Pereira et al. (2011), foram avaliados a disponibilidade de cádmio no solo e seu acúmulo nas culturas de alface e arroz. A concentração de cádmio nas raízes e parte aérea aumentou com as doses de cádmio aplicadas no solo. Em geral, os níveis de cádmio são maiores nas raízes do que nas folhas, acumulando principalmente no vacúolo ou parede celular, sendo baixo o nível de transporte deste para a parte aérea (MILNER E KOCHIAN, 2008).

Na figura 18 são apresentados gráficos com as equações de regressão para as variáveis de fluorescência Fm/FO: fluorescência máxima por fluorescência inicial; Fv/FO: tamanho e número de centros de reações no terço; Fm/Fv: rendimento quântico fotoquímico primário; Phi\_PO: rendimento quântico máximo fotoquímico primário. Com excessão dos parâmetros nos terços médios, todas as características de fluorescência apresentaram comportamento linear decrescente, ou seja, quanto maiores as doses de Cd menores foram os valores de Fm/FO, Fv/FO, Fm/Fv e Phi\_PO.

A Fm/FO foi reduzida em cerca de 0,10 em a cada dose de Cd aplicada. Sendo assim, na ausência de Cd, as plantas apresentaram 6,57 de Fm/FO e, na maior dose avaliada (16 mg L<sup>-1</sup>), as plantas passaram para aproximadamente 6,094 de Fm/FO.

O Fv/FO foi reduzido em 0,10 a cada dose de Cd aplicada, o que da testemunha até a maior dose resultou em redução de 5,57 (testemunha) para 5,094 de Fv/FO na maior dose, 16 mg L<sup>-1</sup>.

Em relação à Fm/Fv, as equações de regressão mostram que a cada dose de Cd aplicada na solução nutritiva, obteve-se reduções na ordem de 0,0027. Em se tratando da Phi\_PO observou-se reduções de 0,0027 conforme a dose aplicada, na testemunha, e apresentou valores de 0,848 para 0,835 de Fm/Fv na maior dose testada (16 mg L<sup>-1</sup>).

Vários estudos demonstraram que os principais locais de ação do Cd são pigmentos fotossintéticos, especialmente a biossíntese da clorofila (QIAN, 2009; LIU, 2014). Em se tratando da fluorescência inicial (FO), a emissão, que ocorre dentro do estágio rápido da fluorescência representa a energia liberada pelas moléculas de clorofila a da antena do fotossistema II, antes dos elétrons migrarem para o centro de reação P680 (PSII), sendo o componente mínimo do sinal da fluorescência (MATHIS; PALLOTIN, 1981). Portanto, é uma perda fotoquímica que se espera, não influenciável pela presença ou não do N.

Alterações nos valores de FO estão relacionadas com as mudanças de temperatura em que as leituras são feitas ao longo do dia, como encontrado por Portes (1990), do que com alterações na estrutura do PSII.

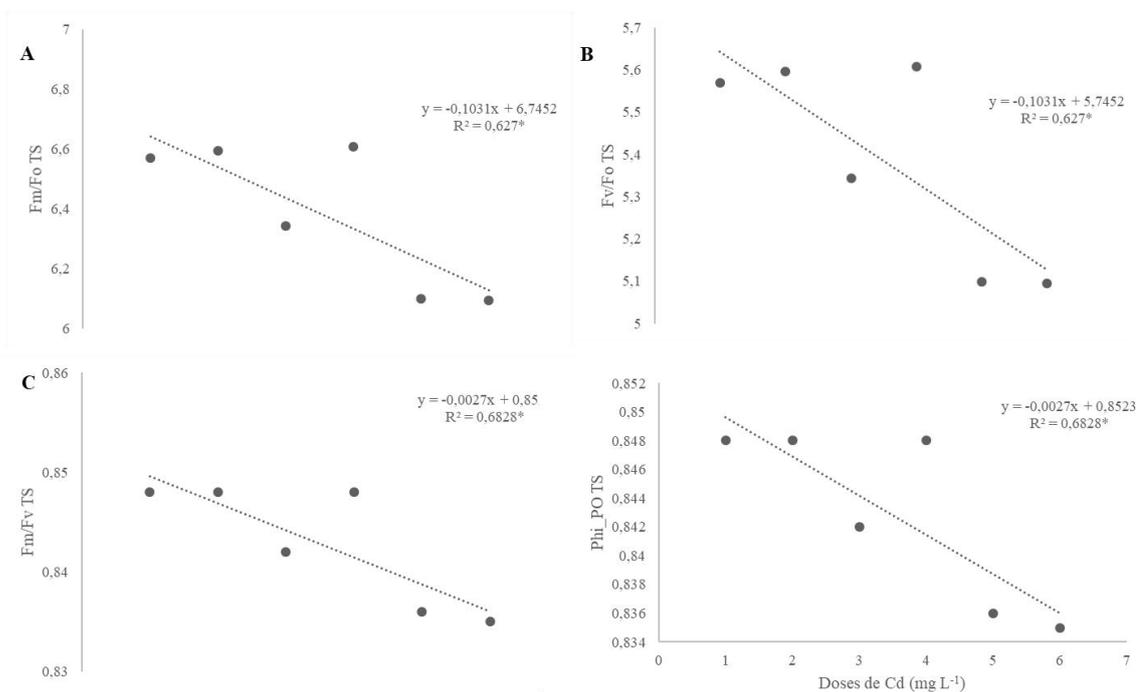


Figura 18 - Características da análise de fluorescência na soja (M7110 – IPRO) submetida a doses de Cd. A: fluorescência máxima por fluorescência inicial no terço superior; B: tamanho e número de centros de reações no terço superior; C: rendimento quântico fotoquímico primário no terço superior; D: rendimento quântico máximo fotoquímico primário no terço superior. \* Significativo a 5%.

A fluorescência máxima (Fm) se encontra situada dentro do estágio rápido da fluorescência. Ocorre mais lentamente que FO e representa a energia liberada ou perdida pelos elétrons que, ejetados dos seus átomos, pela presença de algum bloqueador do fluxo eletrônico, ou falta de demanda na produção de NADPH ou ATP, retornam às suas moléculas de origem (BAKER, 2008). A perda significativa na evolução fotossintética de O<sub>2</sub> em mudas de teste após a exposição ao cádmio pode estar diretamente ligada a prejuízos em aparelhos fotossintéticos, conforme relatado em experimentos anteriores (MURADOGLU, 2015).

O índice de desempenho (PI<sub>ABS</sub>) tem sido considerado como um parâmetro sensível para a detecção e quantificação de estresse em plantas do que a resposta da eficiência máxima do fotossistema II (Fv/Fm ou  $\phi\Phi\text{Po}$ ). Isto se atribui ao fato desta variável relacionar a eficiência de absorção, captura e transferência de energia de excitação pelo fotossistema II proporcionando uma visão maior do grau de efeito do fator estressante (GONÇALVES et al., 2010).

Uma diminuição no desempenho da fotoquímica do PSII em resposta ao estresse de cádmio pode ocorrer devido a mudanças no equilíbrio entre síntese e degradação da proteína D1 do PSII, principal inativação do centro de reação, comprometimento do PSII no lado do doador e uma redução considerável no número de centros de reação ativos (Fv/FO) (SCHELLINGEN, 2014; TÓTH, 2012).

A queda do valor de Fv/Fo sob estresse de cádmio apontou para fortes efeitos nocivos no complexo em evolução de oxigênio que podem ocorrer como resultado da substituição de Mn<sup>2+</sup>, bem como a substituição de Ca<sup>2+</sup> por Cd<sup>2+</sup> (SAYED, 1998; FALLER et al. 2005).

A queda da razão Fv/Fo indica declínio do número de centros fotossintéticos ativos, conseqüentemente, redução na taxa fotoquímica ou no tamanho do pool de QA associado à atividade do FSII (Krause, 1991).

Por fim, para as características, bioquímicas, biométricas e de fluorescência, a maioria dos parâmetros que foram avaliados apresentaram resultados negativos. Esta situação demonstra os prejuízos que o Cd ocasionou à cultura da soja, o que torna necessário ter maior entendimento sobre as relações envolvendo Cd x planta x solo.

## 4 CONCLUSÕES

A presença do elemento traço Cd afetou negativamente o desenvolvimento da soja. Sendo este efeito agravado nas doses mais altas do poluente.

A fixação biológica do nitrogênio (FBN) foi prejudicada pela adição de cádmio, resultados observados no aumento do cádmio na parte aérea e raízes e diminuição dos parâmetros relacionados à nodulação.

## REFERÊNCIAS

ACCIOLY, A.M.A.; SIQUEIRA, J.O. Contaminação química e biorremediação do solo. **Tópicos em Ciências do Solo**, v. 1, p. 299-351, 2000.

ALLOWAY, B.J.; AYERS, D.C. Chemical principles of environmental pollution. 2. Ed. **CRC Press**, 1996. 395p.

AMADO, T. J. C.; SCHLEINDWEIN, J. A.; FIORIN, J. E. Manejo do solo visando à obtenção de elevados rendimentos de soja sob sistema plantio direto. In: THOMAS, A. L.; COSTA, J. A. (Org.). Soja: manejo para alta produtividade de grãos. Porto Alegre: **Evangraf**, 2010.

AUNG, T. T. et al. Co-inoculation effects of *Bradyrhizobium japonicum* and *Azospirillum* sp. on competitive nodulation and rhizosphere eubacterial community structures of soybean under rhizobia-established soil conditions. **African Journal of Biotechnology**, v. 12, p. 2850–2862, 2013.

BAKER, B. Chlorophyll Fluorescence: A Probe of Photosynthesis In Vivo. **Annual Review of Plant Biology**, Boca Raton, v.59, p.89-113, 2008.

BARCELÓ, J. & POSCHENRIEDER, C. Respuestas de las plantas a la contaminación por metales pesados. **Suelo Planta**, 2:345-361,1992.

BENAVIDES, M. P.; GALLEGOS, S. M.; TOMARO, M. L. Cadmium toxicity in plants. **Brazilian Journal Plant Physiology**, v. 17, n. 1, p. 21-34, jan./marc. 2005.

Chaves, L.H.G.; Mesquita, E.F.; Araujo, D.L. e França, C.P. (2010) - Crescimento, distribuição e acúmulo de cobre e zinco em plantas de pinhão- -manso. **Revista Ciência Agrônômica**, vol. 41, n. 2, p. 167-176.

CHEN, S.L.; KAO, C.H. Glutathione reduces the inhibition of rice seedlings root growth caused by cadmium. **Plant Growth Regulation**, v. 16, p.249-252, 1995.

CHEN, X.; WANG, J.; SHI, Y.; ZHAO, M. Q.; CHI, G. Y. (2011). Effects of cadmium on growth and photosynthetic activities in pakchoi and mustard. **Botanical Studies**, 52, 41-46.

CIECKO, Z; KALEMBASA, S; WYSZKOWSKI, M; ROLKA, E. 2004. The effect of elevated cadmium content in soil on the uptake of nitrogen by plants. **Plant Soil Environ.**, 50 (7): 283-294.

CONAB – Companhia Brasileira de Abastecimento. **11º Levantamento - Safra 2018/19**. Acesso em: 09 de julho de 2020.

CONAMA. Resolução no 420, de 28/12/2009. In: **Resoluções do CONAMA**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2012. p. 899–915.

Cupertino, I.C.F.S. (2006) - Respostas morfofisiológicas e nutricionais de plantas jovens de seringueira *Hevea brasiliensis* cultivadas na presença de alumínio, cádmio, níquel e zinco. Tese de Doutorado. Lavras, Universidade Federal de Lavras. 116 p.

DÖBEREINER, J.; ARRUDA, N.B. de; PENTEADO, A. de F. Avaliação da fixação do nitrogênio em leguminosas pela regressão do N total das plantas sobre o peso de nódulos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.1, p.233-237, 1966.

Faller, P.; Kienzler, K.; Krieger-Liszky, A. Mechanism of Cd<sup>2+</sup> toxicity: Cd<sup>2+</sup> inhibits photoactivation of Photosystem II by competitive binding to the essential Ca<sup>2+</sup> site, *Biochim. Biophys. Acta* (2005).

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, [S.I.], v.37, n.4, p529-535, dec. 2019.

FIDALGO, A.F.B. Exposição e acumulação de elementos potencialmente tóxicos em rúcula (*Eruca sativa*). 2014. 52p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Alimentar) - Universidade de Lisboa, Lisboa 2014.

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

GATIBONI, L.C; SMYTH, T.J.; SCHMITH; D.E; CASSOL, P. C.; OLIVEIRA, C.M.B. DE. Limite crítico ambiental de fósforo para solos sul-brasileiros com adição de altas doses de nutrientes In: **Tópicos em ciência do solo**. v.9, agosto, 2015. SBCS, Viçosa, MG. p.144- 171.

GONÇALVES JUNIOR, A.C.; PESSOA, A.C.S. Fitodisponibilidade de Cádmio, Chumbo e Crômio, em soja cultivada em argilossolo vermelho eutrófico a partir de adubos comerciais. **Scientia Agrária**, Curitiba, v.3, n.1-2, p.19-23, jan./dez. 2002.

- GONÇALVES, J. F. C.; Silva, C. E.; Guimarães, D. G.; Bernardes, R. S. Análise dos Transientes da Fluorescência da Clorofila a de Plantas Jovens de *Carapa guianensis* e de *Dipteryx odorata* submetidas a dois ambientes de luz. **Acta Amazônica**, v.40, p.89-98, 2010.
- Grant, C.A.; Buckley, W.T.; Bailey, L.D. e Selles, F. (1998) - Cadmium accumulation in crops. **Canadian Journal of Plant Science**, vol. 78, n. 1, p. 1-17.
- GUIMARÃES, M.A; SANTANA, T.A; SILVA, E.V; ZENZEN, I.L; LOUREIRO, E. M. 2008. Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. **Revista Trópic**.
- Hoagland, D.R.; Arnon, D.I. The water-culture method for growing plants without soil, Calif. Agric. Exp. **Circular 347** (1950).
- Iqbal, N.; Masood, A.; Nazar, R.; Syeed, S. & Khan, N. (2010) Photosynthesis, growth and antioxidant metabolism in mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars differing in cadmium tolerance. **Agricultural Science in China**.
- KAMRAN, M.A; SYED, J. H.; EQANI, S.A.M.A.S.; MUNIS, M.F.H.; CHAUDHARY, H. J. Effect of plant growth-promoting rhizobacteria inoculation on cadmium (Cd) uptake by *Eruca sativa*. **Environmental Science and Pollution Research**, v.22, p.9275-9283, 2015.
- KATHEEB, W. Cadmium-Induced Changes in Germination, Seedlings Growth, and DNA Finger printing of in vitro Grown *Cichorium pumilum* Jacq. **International Journal of Biology**, v. 6; p.65-73, 2014.
- Krause, G.H.; Weis, E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. **Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.** 42 (1991).
- LEE, S.; LEUSTEK, T. The effect of cadmium on sulfate assimilation enzymes in *Brassica juncea*. **Plant Science**, v. 141, p. 201-207, 1999.
- LI, Y.; DHANKHER, O.P.; CARREIRA, L.; LEE, D.; CHEN, A.; SCHROEDER, J.I.; BALISH, R.S.; MEAGHER, R.B. Overexpression of Phytochelatin Synthase in *Arabidopsis* Leads to Enhanced Arsenic Tolerance and Cadmium Hypersensitivity. **Plant and Cell Physiology**, v.45, p.1787-1797, 2004.
- Liu, L.; Chen, H. Sun, J. Li, Y. Z., D.; Li, C. Effects of cadmium (Cd) on seedling growth traits and photosynthesis parameters in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Omics J.** (2014).
- MARSCHNER, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2.ed. New York: **Academic Press**,.889p.
- Mathis, P.; Pailotin, G. In: The biochemistry of plants. Hatch, M.D.; Boardman, N.K. Academic Press, New York, 1981. 97
- MATSUDA, A.; MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. Tolerancia de rizóbios de diferentes procedências ao zinco, cobre e cádmio. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 37, n. 3, p. 343-355, 2002.

MELVILLE, F.; BURCHETT, M. Genetic variation in *Avicennia marina* in three estuaries of Sydney (Australia) and implications for rehabilitation and management. **Marine Pollution Bulletin** 44, 469-479, 2002.

Milner, M.J. e Kochian, L.V. (2008) - Investigating heavy-metal hyperaccumulation using *Thlaspi caerulescens* as a model system. **Annals of Botany**, vol. 102, n. 1, p. 3-13.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Soja**, 2018. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 09 de julho de 2020.

Munzuroglu, O.; Geckil, H. Effects of metals on seed germination, root elongation, and coleoptile and hypocotyl growth in *Triticum aestivum* and *Cucumis sativus*. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v.43, p.203-213, 2002.

Muradoglu, F.; Gundogdu, M.; Ercisli, S.; Encu, T.; Balta, F.; Jaafar, H.Z.E. Zia-Ul-Haq, M. Cadmium toxicity affects chlorophyll a and b content, antioxidant enzyme activities and mineral nutrient accumulation in strawberry, **Biol. Res.** (2015).

NIES, D. H. Efflux-mediated heavy metal resistance in prokaryotes. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 27, p. 313–339, 2003. AMADO, T. J. C.; SCHLEINDWEIN, J. A.; FIORIN, J. E. Manejo do solo visando à obtenção de elevados rendimentos de soja sob sistema plantio direto. In: THOMAS, A. L.; COSTA, J. A. (Org.). *Soja: manejo para alta produtividade de grãos*. Porto Alegre: Evangraf, 2010.

OLIVEIRA, L. F. C.; LEMKE-DE-CASTRO, M. L.; RODRIGUES, C.; BORGES, J. D. Adsorção e deslocamento do íon cádmio em solos do cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 848-855, 2011.

OLIVEIRA, J.A.; CAMBRAIA, J.; CANO, M.A.O.; JORDÃO, C.P. Absorção e acúmulo de cádmio e seus efeitos sobre crescimento relativo de plantas de aguapé e salvinia. **Revista Brasileira Fisiologia Vegetal**, v. 13, n. 3, p. 329-341, 2001.

PERALTA, J.R.; GARDEA-TORRESDEY, J.L.; TIEMANN, K.J.; GOMEZ, E.; ARTEAGA, S.; RASCON, E.; PARSONS, J.G. Uptake and effects of five metals on seed germination and plant growth in alfafa (*Medicago sativa* L.). **Bulletin Environmental Contamination and Toxicology**, v. 66, p. 727-734, 2001.

PEREIRA, B.F.F.; ROZANE, D.E.; ARAÚJO, S.R.; BARTH, G.; QUEIROZ, R. J. B.; NOGUEIRA, T.A.R.; MORAES, M.F.; CABRAL, C.P.; BOARETTO, A.E.; MALAVOLTA, E.; PERIS, M.; MICÓ, C.; RECATALÁ, L.; SÁNCHEZ, R.; SÁNCHEZ, J. Cadmium availability and accumulation by lettuce and rice. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 645-654, 2011.

POPOVA, L; MASLENKOVA, L; YORDANOVA, R; KRANTEV, A; SZALAI, G; JANDA, T. 2008. Salicylic Acid Protects Photosynthesis Against Cadmium Toxicity In Pea Plants. *Gen. Appl. Plant Physiology*. 133-148.

PORTES, T. DE A. A emissão de fluorescência pela clorofila a e o balanço de O<sub>2</sub> como parâmetros de determinação da variabilidade genética condicionante da produtividade em feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). 1990. 96 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1990.

POSCHENRIEDER, C.; GUNSE, B.; BARCELO, J. Influence of cadmium on water relations, stomatal resistance, and abscisic acid content in expanding bean leaves. **Plant Physiology**, Rochville, v. 90, p. 1365-1371, 1989.

Preston, W.; Nascimento, C. W. A.; Biondi, C. M.; Souza Junior, V. S.; Silva, W. R.; Ferreira, H. A. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1028-1037, 2014.

Qian, H.; Sun, J. Li, L. Chen, W.; Sheng, G.D.; Liu, W.; Fu, Z. Combined effect of copper and cadmium on *Chlorella vulgaris* growth and photosynthesis-related gene transcription, **Aquat. Toxicol.** (2009).

SARWAR, N; SAIFULLAH, SUKHDEV, S.M; MUNIR, H.Z; ASIF, N; SADIA B; GHULAM F. 2010. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants (Review). **J. Sci. Food Agric.**, 90: 925-937.

Sayed, O.H. Analysis of photosynthetic responses and adaptation to nitrogen starvation in *Chlorella* using in vivo chlorophyll fluorescence, **Photosynthet.** 35 (1998).

Schellingen, K.; Straeten, D.V.D.; Vandenbussche, F.; Prinsen, E.; Remans, T.; Vangronsveld, J.; Cuypers, A. 2014. Cadmium-induced ethylene production and responses in *Arabidopsis thaliana* rely on ACS2 and ACS6 gene expression, **BMC Plant Biol.** (2014).

SRIPRANG, R.; HAYASHI, M.; YAMASHITA, M.; ONO, H.; SAEKI, K.; MUROOKA, Y. A novel bioremediation system for heavy metals using the symbiosis between leguminous plant and genetically engineered rhizobia. **Journal of Biotechnology**, v. 99, p. 279-293, 2002.

STOKES, J.D.; PATON, G.I.; SEMPLE, K.T. Behaviour and assessment of bioavailability of organic contaminants in soil: relevance for risk assessment and remediation. **Soil Use and Management**, v. 21, p. 475-486, 2006.

STRASSER, R.J.; A. SRIVASTADA AND M. TSIMILLI-MICHAEL. The fluorescence transiente as a tool to characterize and screen photosynthetic samples, pp. 445-483. In: YUNUS, M.; PATHRE, U.; MOHANTY, P (eds.). *Probing Photosynthesis: Mechanism, Regulation and Adaptation*. Taylor and Francis. New York, 2000.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2008. p.819.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRGS, 1985. (Boletim técnico, 5). 174p.

Tóth, T.; Zsiros, O.; Kis, M.; Garab, G.; Kovács, L. Cadmium exerts its toxic effects on photosynthesis via a cascade mechanism in the cyanobacterium, *Synechocystis* PCC 6803. **Plant Cell Environ.** (2012).

VINODHINI, R.; NARAYANAN, M. Bioaccumulation of heavy metals in organs of fresh water fish *Cyprinus carpio* (Common carp). **Intitute Journal Environment Science Technology**, v. 5, n. 2, p. 179-182, 2008.

Wahid, A.; Ghani, A.; Ali, I. & Ashraf, M.Y. (2007) Effects of cadmium on carbon and nitrogen assimilation in shoots of mungbean [*Vigna radiata* (L.) seedlings. **Journal of Agronomy and Crop Science**.

ZENK, M. H. Heavy metal detoxification in higher plants – a review. **Gene**, 179:21-30, 1997.

ZHU, X.F; ZHENG, C; HU, Y.T; JIANG, T; LIU, Y; DONG, N.Y; YANG, J. L & ZHENG, S.J. 2011. Cadmium-induced oxalate secretion from root apex is associated with cadmium exclusion and resistance in *Lycopersicon esculentum*. **Plant, Cell and Environ.**

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo do elemento traço cádmio demonstra-se de extrema relevância no Brasil, em especial na Região Centro-Oeste, especialmente em Rio Verde, no sudoeste goiano, onde o agronegócio é um dos pilares da economia. A cultura da soja (*Glycine Max* L.) deve ter destaque nos estudos por ser a cultura mais cultivada em todo o mundo, não diferindo do Brasil.

Associação da cultura com elementos traço, como o Cd, merece foco de estudo, pois os prejuízos que este ET causa nas culturas são grandes, podendo afetar tanto plantas e animais como seres humanos.

A partir dos estudos realizados, será possível obter informações, de maneira a indicar aos produtores medidas que reduzam os riscos de produção em um eventual problema com Cd.