

**RESPOSTAS MORFOFISIOLÓGICAS E
NUTRICIONAIS DE PLANTAS JOVENS DE
SERINGUEIRA *Hevea brasiliensis* [(Willd. ex.
Adr. de Juss.) Muell.-Arg.] CULTIVADAS NA
PRESENÇA DE ALUMÍNIO, CÁDMIO,
NÍQUEL E ZINCO**

IVANA CRISTINA FERREIRA SANTOS CUPERTINO

2006

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Cupertino, Ivana Cristina Ferreira Santos.

Respostas morfofisiológicas e nutricionais de plantas jovens de seringueira [*Hevea brasiliensis* (Willd. ex. ADR. de Juss.) Muell.-Arg.] cultivadas na presença de alumínio, cádmio, níquel e zinco / Ivana Cristina Ferreira Santos Cupertino. -- Lavras : UFLA, 2006.

67 p. : il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2006.

Orientador: Luiz Edson Mota de Oliveira.

Bibliografia.

1. Metais pesados. 2. Redutase do nitrato. 3. Ecofisiologia. 4. Seringueira. 5. Metabolismo do nitrogênio. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 583.950413

IVANA CRISTINA FERREIRA SANTOS CUPERTINO

**RESPOSTAS MORFOFISIOLÓGICAS E NUTRICIONAIS DE
PLANTAS JOVENS DE SERINGUEIRA *Hevea brasiliensis* [(Willd. ex.
Adr. de Juss.) Muell.-Arg.] CULTIVADAS NA PRESENÇA DE
ALUMÍNIO, CÁDMIO, NÍQUEL E ZINCO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Agronomia, área de concentração
em Fisiologia Vegetal, para a obtenção do título de
“Doutor”.

Orientador

Prof. Dr. Luiz Edson Mota de Oliveira

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

2006

IVANA CRISTINA FERREIRA SANTOS CUPERTINO

**RESPOSTAS MORFOFISIOLÓGICAS E NUTRICIONAIS DE
PLANTAS JOVENS DE SERINGUEIRA *Hevea brasiliensis* [(Willd. ex.
Adr. de Juss.) Muell.-Arg.] CULTIVADAS NA PRESENÇA DE
ALUMÍNIO, CÁDMIO, NÍQUEL E ZINCO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Agronomia, área de concentração
em Fisiologia Vegetal, para a obtenção do título de
“Doutor”.

APROVADA em 19 de julho de 2006

Prof. Dra. Janice Guedes de Carvalho	UFLA
Prof. Dr. Francisco Dias Nogueira	EPAMIG
Prof. Dra. Ângela Maria Soares	UFLA
Dr. Alessandro Carlos Mesquita	CNPq
Dra. Ana Rosa Ribeiro Bastos	CNPq

Prof. Dr. Luiz Edson Mota de Oliveira
UFLA
(Orientador)
LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus,
pela vida, pelas graças e por me fortalecer para alcançar esta vitória.
A minha mãe,
pelo seu amor, carinho e compreensão.
Ao Edgar,
meu marido, que muito me ajudou.

OFEREÇO

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram,
participando e compartilhando comigo desta alegria de mais um dever
cumprido, e de mais um sonho realizado.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, que tudo pode, sem ele nada é possível.

A minha mãe, pelo carinho, incentivo e presença forte na minha vida.

Ao meu marido, Edgar, por ter estado comigo nesta caminhada, sempre me ajudando nas horas mais difíceis.

A minha sogra Dalila, pela ajuda e compreensão.

À Universidade Vale do Rio Doce, pela oportunidade pela concessão da licença, com remuneração total, e pela confiança depositada.

À Universidade Federal de Lavras, pela oportunidade de realização do Doutorado.

Ao professor Dr. Luiz Edson Mota de Oliveira, por ter aceitado me orientar, pelo apoio sempre constante, pelas palavras de ensinamento, pela amizade e por sempre estar disponível nas horas em que precisei dele.

À professora Dra. Janice Guedes de Carvalho, por ter me recebido de braços abertos quando cheguei à UFLA, pela co-orientação, pela amizade e pela confiança demonstrada.

Ao professor Dr. Valdemar Faquin, pela constante colaboração durante o desenvolvimento do experimento.

À professora Dra. Ângela Maria Soares, pela constante disponibilidade em colaborar.

Ao professor Dr. Evaristo Mauro de Castro, pelas contribuições e auxílio na parte anatômica do trabalho.

Ao pesquisador Dr. Alessandro Carlos Mesquita, pela amizade, companheirismo e pelas ricas sugestões na realização deste trabalho.

Aos funcionários da Fisiologia Vegetal, Evaristo, Tanhã, Lena, Joel, Odorêncio, Izonel, Tina e Barrinha, pelo suporte técnico e amizade.

Ao servidor do Departamento de Solos, Adalberto, pela ajuda prestada no desenrolar do experimento.

A minha amiga Cida, da UNIVALE, pela amizade e pelo apoio.

Aos meus colegas do grupo *Hevea*: Karine, Lisandro, Guto, Andréa, Paulo Cairo, Patrícia, Aurélio e Marilza, pelo companheirismo e pela união.

A todos os colegas do setor de Fisiologia Vegetal, pelo agradável convívio.

A Karine e Rairys, pela amizade, compreensão e pela disponibilidade em me ajudar, todas as vezes que precisei.

Aos estudantes de iniciação científica, Matheus, Genáina e Ana Karla, pela amizade e ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
2.1 Os metais	5
2.2 A seringueira	8
2.3 Aspectos fisiológicos e anatômicos da fitotoxidez.....	9
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	12
3.1 Material vegetal e condições de cultivo	12
3.2 Aplicação de metais pesados	13
3.3 Análise do crescimento.....	15
3.4 Avaliações do porômetro.....	16
3.5 Quantificação de metais pesados e teor de N, P, K, Ca, Mg e S	16
3.6 Eficiência fotoquímica do fotossistema II	16
3.7 Atividade da redutase do nitrato (RN).....	17
3.8 Características anatômicas.....	17
3.9 Delineamento experimental e análises estatísticas	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1 Sintomas de fitotoxidez	20
4.2 Efeito dos metais no crescimento de plantas de seringueira.....	25
4.3 Resistência estomática, transpiração e eficiência fotoquímica do fotossistema II.....	32
4.4 Teor de metais	38
4.5 Teor de N, P, K, Ca, Mg e S.....	42
4.6 Atividade da redutase do nitrato (RN).....	50
5. CONCLUSÃO.....	54

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
------------------------------------	----

RESUMO

CUPERTINO, Ivana Cristina Ferreira Santos. **Respostas morfofisiológicas e nutricionais de plantas jovens de seringueira [*Hevea brasiliensis* (Willd. ex. ADR. de Juss.) Muell.-Arg.] cultivadas na presença de alumínio, cádmio, níquel e zinco.** 2006. 66p. Tese (Doutorado em Agronomia. Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.*

Com o objetivo de avaliar o efeito de diferentes concentrações de alumínio (Al), cádmio (Cd), níquel (Ni) e zinco (Zn) sobre o desenvolvimento de plantas de seringueira [*Hevea brasiliensis* (Willd. ex. ADR. de Juss.) Muell. Arg.], este trabalho foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Biologia, Setor de Fisiologia Vegetal, da Universidade Federal de Lavras, por meio do processo hidropônico. Trinta dias após germinação, as plantas foram transplantadas para bandejas com capacidade para 30 litros contendo solução nutritiva de Bolle-Jones modificada. Noventa dias após germinação, as plantas foram transferidas para vasos com capacidade para 8,0 L, contendo a mesma solução nutritiva. Noventa dias após transplantio, as plantas foram submetidas aos tratamentos com metais (Cd: 0, 270, 400 e 530 μM ; Ni: 0, 29, 56 e 85 μM ; Zn: 0, 250, 380 e 510 μM ; e Al: 0, 1000, 1800 e 3600 μM). O pH da solução foi mantido em 5,5 a 6,0, com exceção da solução para o tratamento com Al, cujo pH foi mantido em 4,0. Foram analisadas as seguintes características: produção de matéria seca; crescimento da raiz e da parte aérea; resistência estomática e transpiração utilizando o porômetro; quantificação de Cd, Ni, Zn, Ca, Mg por espectrometria de absorção atômica, K por fotometria de chama, P por colorimetria, S por turbidimetria, N pelo método de Kjeldahl (N total) e Al pelo método da aluminona. A eficiência fotoquímica do fotossistema II (PSII) foi estimada à temperatura ambiente, utilizando-se o fluorômetro PEA, a atividade da enzima redutase do nitrato (RN) nas raízes e, ao final do experimento, procedeu-se à coleta de material, que foi separado em raiz, caule e folha e fixado em álcool 70% para a realização de cortes anatômicos. Com os resultados, podem-se verificar sintomas de amarelecimento para o Cd e Zn, clorose para o Ni, necrose e enrugamento para Cd, Ni, Zn e Al. Verificou-se redução na produção de matéria seca e no comprimento da raiz, caule, folha e parte aérea, na presença de todos os metais, além de redução no comprimento R/PA. Observou-se elevação na resistência estomática e na taxa de transpiração, quando na presença do Cd. Todos os metais avaliados tiveram aumento de teor

* Comitê Orientador: Luiz Edson Mota de Oliveira - UFLA (Orientador), Janice Guedes de Carvalho – UFLA (Co-orientador)

em todas as partes da planta, à medida que se aumentava a concentração aplicada. Observou-se redução nos teores de N, P, K, Ca, Mg e S nas raízes, caules e folhas, quando na presença dos metais. Houve decréscimo na eficiência fotoquímica do fotossistema II (PSII), no último mês de avaliação em todas as concentrações. No caso do Cd, foi observada maior eficiência quando houve aumento da concentração. Para os outros tratamentos, não houve diferença significativa. A enzima redutase do nitrato (RN) teve sua atividade reduzida na presença dos metais. Observou-se redução no número de estômatos nos tratamentos com todos os metais aplicados, independente das concentrações.

ABSTRACT

CUPERTINO, Ivana Cristina Ferreira Santos. **Morphological and nutritional responses of young plants of rubber tree [*Hevea brasiliensis* (Willd. ex. Adr. of Juss.) Muell.-Arg.] cultivated with the aluminum, cadmium, nickel and zinc.** 2006. 66p. Thesis (Doctorate in Agronomy. Plant Physiology) -Federal University of Lavras, Lavras.

With the objective of evaluate the effect of different concentrations of Aluminum (Al), Cadmium (Cd), Nickel (Ni) and Zinc (Zn), on the development of rubber tree plants [*Hevea brasiliensis* (Willd. ex Adr. of Juss.) Muell. Arg.], young plants were grown in greenhouse, by hydroponic techniques at the Department of Biology - Plant Physiology of the Universidade Federal de Lavras. Thirty days after germination, the plants were transplanted to trays containing 30 L of modified Bolle – Jones solution. Ninety days after germination, the plants were transferred to 8,0 L recipients, containing the same solution. Ninety days after transplant, the plants were submitted to treatments with metals (Cd: 0, 270, 400 and 530 μM ; Ni: 0, 29, 56 and 85 μM ; Zn: 0, 250, 380 and 510 μM ; e Al: 0, 1000, 1800 and 3600 μM). The pH of the solution ranged between 5,5 to 6,0, with the exception of the solution of the Al treatment which pH was kept in 4,0. The following characteristics were analyzed: dry matter production; above and below ground growth; the stomatal resistance and transpiration were analyzed with a Steady State Porometer (LICOR 1600); the leaf water potential was evaluated by a pressure chamber (Soil Moisture-model 3005); spectrophotometric quantification of heavy metals and the N, P, K, Mg and S in roots, shoot and leaves through the nitric-perchloric digestion by atomic absorption. The photosynthetic efficiency of PS II was characterized by a fluorimeter (PEA, Hansatech, Norfolk, the United Kingdom); the activity of the Nitrate Reductase enzyme (RN) in roots; and at the end of the experiment, the samples of the leaves shoots and roots were collected and fixed in alcohol 70% for anatomical studies. Yellow colour symptoms were verified for Cd and Zn, chlorosis for the Ni, necrosis and wrinkling for Cd, Ni, Zn and Al. A reduction in the production of dry matter and the length in the root, shoot, leaf and aboveground part, in the presence of all metals, in addition to a reduction in values of ratio R/PA. An increment in the stomatal resistance in transpiration rate was observed in the presence of Cd. All the evaluated metals had an increase in their concentration in all the plant parts, concomitantly with the increase of concentration. There was observed a reduction in N, P, K, Ca, Mg and S levels in roots, shoots and leaves when in presence of metals. There was

decrease in photochemical efficiency of photosystem II(PSII) in last month of evaluation in all concentrations used. In relation to Cd it was observed a higher efficiency where occurred an increase in concentration. For all the treatments there were no significative difference. The Nitrate Reductase enzyme (RN) had its activity reduced in the presence of the metals. A reduction in the number of stomata was observed for all the studied concentrations for all evaluated metals.

1 INTRODUÇÃO

Entendem-se por metais pesados os elementos químicos cuja densidade seja superior a 5 kg dm^{-3} , abrangendo um grupo de 38 elementos, como metais, semimetais e, até mesmo, não-metais, como o selênio. Alguns dos elementos denominados metais pesados, em pequenas concentrações, constituem nutrientes essenciais ao desenvolvimento de plantas. Já em altas concentrações, tornam-se perigosos, pois são introduzidos na cadeia alimentar, podendo contaminar plantas e animais (Valadares et al., 1983), uma vez que apresentam forte afinidade por muitos compostos orgânicos (Kabata-Pendias & Pendias, 1984).

Geralmente, em regiões próximas a complexos industriais, perímetros urbanos e em áreas rurais de intensa tecnologia, encontram-se nos solos poluídos, altas concentrações de chumbo (Pb), cádmio (Cd), zinco (Zn), níquel (Ni), cobre (Cu), mercúrio (Hg), arsênio (As) e muitos outros metais pesados (Alloway, 1990). Já em solos de cerrado, se salientam baixo pH e toxidez de alumínio (Al) (Alloway, 1990).

Ao mesmo tempo em que a contaminação com metais pesados afeta o crescimento, a distribuição e o ciclo biológico das espécies vegetais (Barceló & Poschenrieder, 1992), a vegetação é uma alternativa para a recuperação de solos degradados pelo excesso desses elementos (Salte et al., 1995). Entretanto, as espécies vegetais devem ser avaliadas quanto à sua capacidade de tolerância a esse tipo de estresse. Segundo Baker (1987), a sobrevivência das espécies que crescem em solos contaminados é relacionada à capacidade destas de tolerar, e não de anular, a toxicidade do metal.

A concentração e o acúmulo de metais nos tecidos vegetais dependem de sua disponibilidade na solução do solo. Segundo Baker (1987) e Verkleij &

Prast (1989), as espécies tolerantes acumulam, geralmente, maiores concentrações de metais pesados na raiz em relação à parte aérea. Isso indica que as plantas que crescem nessas condições absorvem os metais, porém, limitam sua translocação.

O movimento do metal da solução externa do solo para o apoplasto da raiz é um processo passivo, não metabólico e caracterizado por fluxo de massa ou difusão resultado de um gradiente de concentração (Taiz & Zeiger, 2004). Os elementos de carga positiva ficam retidos nos poros da rede de celulose da parede celular e, dependendo da densidade de cargas negativas, estes podem ser concentrados e, por meio do gradiente criado na membrana, ocorre o seu transporte (por exemplo, Pb^{2+}) para o interior da célula. Contudo, ainda não está perfeitamente definido o mecanismo que permite que os elementos tóxicos atravessem a membrana plasmática, sendo os diferentes canais de íons considerados como hipóteses. A corrente transpiratória dos vegetais é o principal caminho pela qual os elementos químicos absorvidos percorrem o apoplasto passivamente e são levados aos órgãos superiores.

Os sintomas de fitotoxidez são bastante variados, sendo a absorção, o acúmulo e a translocação de metais pesados influenciados pelo nível de contaminação do solo. Estes efeitos são diferenciados dependendo da espécie e, também, por interações iônicas no solo e na planta (Marques, 1996).

Apesar da freqüente preocupação com aspectos ecológicos e ambientais, no que diz respeito ao excesso de metais pesados no sistema solo-planta, pouca ênfase tem sido dada ao efeito desses elementos sobre a flora arbórea tropical. Devido às suas características de crescimento, as espécies arbóreas podem se tornar uma alternativa viável para a recuperação ou a utilização de solos contaminados com metais pesados. A recuperação de áreas degradadas pela mineração ou mesmo poluição visa restaurar o ambiente, procurando, na maioria das vezes, devolver ao local uma cobertura vegetal de porte arbóreo. Diante

disso, torna-se de grande importância conhecer o comportamento das espécies florestais, em relação aos metais pesados.

Os níveis tóxicos de metais pesados em solução nutritiva no tecido vegetal já foram testados com espécies herbáceas acumuladoras de metais (Shaw, 1989; Pollard & Baker, 1997), algumas espécies arbóreas de clima temperado (Baker, 1981) e outras arbóreas de clima tropical (Marques et al., 2000). Ainda são preexistentes trabalhos que relatem o efeito isolado da toxidez por metais pesados e as determinações de níveis críticos de toxidez desses elementos em seringueira.

Concentrações de alguns metais pesados, consideradas tóxicas no tecido vegetal, têm sido sugeridas (Kabata-Pendias & Pendias, 1984), porém, esses valores são muito amplos, variáveis e totalmente desconhecidos para plantas não-cultivadas, como as arbóreas tropicais. Essas plantas têm capacidade de imobilizar maior quantidade de metais nos tecidos em relação às herbáceas, reduzindo o tempo de ciclagem desses elementos no solo, minimizando o potencial de risco causado por estes e facilitando a remediação do solo. Logo, as arbóreas apresentam grande potencial para programas de revegetação de áreas contaminadas com metais pesados.

A seringueira [*Hevea brasiliensis* (Willd. ex. ADR. de Juss.) Muell.-Arg.] pertence à família Euforbiácea, de origem amazônica. Apresenta grande diversidade genética e capacidade de adaptação em outras regiões do país em que há ampla diversidade das características edafoclimáticas (Pereira, 1992; Lima, 1998). Não há nenhum registro, no que diz respeito à seringueira, de efeitos isolados no aspecto anatomofisiológico, de metais pesados, como Cd, Ni e Zn. Entretanto, estudos realizados com toxidez de Al mostraram que este metal tem baixa translocação em seringueira, se concentrando nas raízes, além de ter diminuído a absorção de nitrogênio (N) e fósforo (P) pelas raízes (Souza, 1991).

Os objetivos da realização deste trabalho foram avaliar o efeito de diferentes concentrações dos metais Al, Cd, Ni e Zn no crescimento e no acúmulo de matéria seca, nas diferentes partes da planta, no aspecto fisiológico e no aspecto anatômico, além de descrever os sintomas de fitotoxidez em mudas de seringueira (*Hevea brasiliensis*) cultivadas em solução nutritiva.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Os metais

O Al é um metal presente em solos de Cerrado, que constituem cerca de 20% a 25% do território brasileiro.

Várias espécies vegetais liberam ânions de ácidos orgânicos de suas raízes em resposta a íons tóxicos de Al presente no ambiente radicular. Devido ao fato de os ácidos orgânicos poderem carregar uma variedade de cargas negativas, eles podem formar complexos com o Al, reduzindo sua atividade em solução e toxicidade para as raízes (Delhaize & Ryan, 1995).

A toxicidade do Al pode estar relacionada a uma diminuição no teor relativo de nutrientes, segundo alguns trabalhos. Oliveira & Rena (1989) mostraram que, em mandioca, o Al reduziu a translocação do P para a parte aérea, em decorrência da sua fixação nas raízes. A fixação do P nas raízes é resultado das reações de absorção-precipitação entre o Al e o P, ocorridas no espaço livre aparente (Foy et al., 1972) e dentro das células epidérmicas ou corticais (McCormick & Borden, 1972).

O sintoma primário da toxicidade do Al na maioria das plantas é a inibição do crescimento das raízes (Naidoo et al., 1978). Esta inibição do crescimento radicular pode ser explicada pelo efeito do Al sobre a divisão e o alongamento celular (Klimashevskii & Dedov, 1976). Na parte aérea, de acordo com a planta, o efeito da toxicidade é variável, indo desde a manifestação da deficiência de P (Oliveira, 1979) até a deficiência de cálcio ou magnésio (Bengtsson et al., 1988).

O íon alumínio é pouco móvel na planta, mas, na forma de quelato e de ácido orgânico, sua translocação é favorecida (Bueno, 1987).

O Cd é um metal encontrado na exploração e no beneficiamento de outros metais, como Zn e Pb (Boon & Soltanpour, 1992); na produção de tintas, pilhas e baterias (Potsch, 1967); nos combustíveis e lubrificantes (Olsen, 1972); nos fertilizantes, principalmente os fosfatados (Mulla et al., 1980; Langenbach & Serpa (1985); nos corretivos (Amaral Sobrinho et al., 1992); nos fungicidas (Lagerwerff, 1972) e nos resíduos industriais e urbanos (Alloway, 1990; Valadares et al., 1983).

O processo de absorção foliar ou radicular do Cd é, provavelmente, um mecanismo passivo, sendo a movimentação interna na planta semelhante à do cálcio (Ca) (Cutler & Rains, 1974; Mengel & Kirkby, 1982). A translocação de Cd está diretamente ligada à solubilidade deste metal nas raízes. Em raízes de milho que possuíam alta proporção de Cd na fração solúvel, houve alta mobilidade (Guo & Marschner, 1995). O Cd pode ser transportado no xilema como íon ou na forma de complexo, principalmente como ácido cítrico (Senden et al., 1995), e a transferência de cádmio das raízes para a parte aérea em feijão parece não ser governada por processos metabólicos (Hardiman & Jacoby, 1984).

A principal causa de toxidez pelo Cd parece ser sua combinação com grupos tiólicos (-SH) de enzimas e proteínas, o que provoca desarranjos no metabolismo vegetal (Malavolta, 1980; Lagriffoul et al., 1998).

Em detrimento de seu papel como elemento útil às plantas, as pesquisas com Ni têm destacado mais seu efeito nocivo aos vegetais. Isto se deve à posição do metal no centro da tabela periódica, conferindo-lhe alta densidade e, por consequência, qualificando-o como metal pesado.

O Ni tornou-se um sério poluente a partir das emissões em operações de processamento do metal e pelo aumento da combustão de óleo e carvão mineral. Iodo (I) e certos fertilizantes fosfatados também podem ser importante fontes poluidoras de Ni. O Ni apresenta-se quelatizado ao lodo de esgoto, por isso

torna-se facilmente disponível para as plantas, sendo altamente fitotóxico (Kabata-Pendias & Pendias, 1984).

O Ni pode afetar o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Marschner, 1995), tendo Brown et al. (1987) proposto considerá-lo essencial. Entre os aspectos positivos do Ni para as plantas, destacam-se a participação na estrutura e no funcionamento da enzima urease (Dixon et al., 1975), que atua na hidrólise da uréia; a influência no complexo enzimático hidrogenase, que aumenta a eficiência da fixação do nitrogênio (N) em leguminosas (Klucas et al., 1983) e a participação na síntese de fitoalexinas, que melhora a resistência das plantas às doenças (Walker et al., 1985).

O Ni é absorvido pelas raízes das plantas na forma iônica (Ni^{2+}) e complexado como quelato (Crooke, 1956). É transportado pelo xilema como cátion e complexo orgânico, dependendo da espécie vegetal. Por exemplo, em tomateiro, a maior proporção é translocada como cátion, enquanto que, em milho, cenoura, abóbora e amendoim, ocorre o transporte na forma de complexos orgânicos (Mishra & Kar, 1974). Na planta, ele é muito móvel, sendo, em casos de deficiência, sua redistribuição muito rápida (Mishra & Kar, 1974).

Em níveis elevados, o Ni interfere na absorção de ferro (Fe) e inibe o seu metabolismo (Agarwala et al., 1977), diminui a concentração de clorofila em folhas de café (Pavan & Bingham, 1982), aumenta a atividade da peroxidase e provoca distúrbios mitóticos nas pontas das raízes de algumas plantas (Mishra & Kar, 1974).

O Zn é um elemento essencial para homens, animais e plantas superiores. Ele tem papel fundamental em várias funções celulares críticas, como no metabolismo protéico, na expressão de genes, na estrutura da cromatina, no metabolismo fotossintético do carbono e no metabolismo do ácido indolacético (Valle & Falchuk, 1993; Marschner, 1995; Prasad, 1995; Cakmak

& Braun, 2001). O zinco é um importante componente de muitas enzimas vitais, tendo um papel catalítico e estrutural ou atuando como estabilizador para proteínas de membrana e ligadas ao DNA (dedo de Zn) (Valle & Falchuk, 1993). Porém, é tóxico em altas concentrações, podendo retardar o crescimento de plantas e causar distúrbios em vários processos fisiológicos essenciais (Cakmak & Marschner, 1993; Chaney, 1993; Bhattacharjee & Mukherjee, 1994; Prasad et al., 1999; Panda et al., 2003).

Em condições tropicais, em que os solos apresentam, geralmente, baixos teores de Zn, a adição deste elemento como fertilizante é prática comum. Dados fornecidos por Pepper et al. (1983) mostram que, além da adição como fertilizantes à base de Zn, a aplicação de rejeitos industriais, pesticidas e de lixo urbano representa um importante meio de incorporação de quantidades excessivas deste elemento no solo. Outra fonte de contaminação por zinco é a incorporação de lodo de esgoto (Boawn & Rarmusser, 1971).

O Zn é pouco móvel nas plantas (Mengel & Kirkby, 1982); geralmente, as raízes possuem muito mais zinco que a parte aérea.

O Zn encontra-se concentrado em cloroplastos, especialmente em algumas plantas, como espinafre, no vacúolo e nas membranas celulares. Ele é essencial para a síntese do triptofano (precursor do ácido indolacético ou AIA), além de ser ativador específico de muitas enzimas, participar do processo da respiração e estimular a formação de gemas terminais (Baeyens, 1970; Mengel & Kirkby, 1982).

2.2 A seringueira

Pertencente à família das Euforbiáceas, recebe vulgarmente o nome de seringueira, seringueira-branca ou árvore-da-borracha. É uma planta originária da Amazônia e foi explorada, durante várias décadas, de forma totalmente extrativista naquela região. Hoje, além do extrativismo, plantam-se seringueiras

em pequenos agrupamentos distribuídos nas matas, para facilitar e reduzir longas caminhadas na extração do látex.

A biossíntese de látex e, conseqüentemente, a produção de borracha são resultado de uma complexa cadeia de eventos biofísicos, nutricionais e metabólicos que estão relacionados à variação das condições climáticas, com a produção e o transporte de carboidratos fotoassimilados, com a disponibilidade de carboidratos de reserva e com a demanda por outros tecidos drenos das árvores (Miguel et al., 2005).

Muitos trabalhos têm estudado as diferenças na estrutura anatômica da folha das plantas em relação ao ambiente, além de buscarem possíveis respostas para esse comportamento. Medri & Lleras (1980) avaliaram a anatomia foliar de clones diplóides e poliplóides de seringueira, observando que o nível de ploidia influenciou o comportamento anatômico dessas plantas, de forma a ser um indicativo de maior tolerância à seca. Porém, pouco se sabe sobre o efeito de metais na estrutura anatômica de seringueira.

2.3 Aspectos fisiológicos e anatômicos da fitotoxidez

A presença de íons metálicos dentro de uma célula vegetal pode causar um efeito drástico sob o metabolismo vegetal e os metais pesados podem agir bloqueando a cadeia transportadora de elétrons e degradando clorofila (Quartacci et al., 2001; Patsikka et al., 2002). As plantas têm um sistema de defesa antioxidante enzimático e não-enzimático que permite a proteção do conteúdo celular de danos oxidativos.

A exposição a metais pesados e outros fatores adversos do ambiente pode levar a homeostase celular e intensificar a produção de várias espécies reativas de oxigênio como superóxido (O_2^-), radicais hidroxila (OH^-) que são produzidas continuamente pelo metabolismo vegetal. Altas concentrações dessas

espécies reativas de oxigênio podem retardar as funções fisiológicas e celulares (Asada, 1994; Gille & Singler, 1995).

A estimativa da atividade da enzima redutase do nitrato (RN) tem sido utilizada, com sucesso, como parâmetro indicativo da resposta fisiológica de plantas submetidas a condições adversas (Meguro & Magalhães, 1982). A variação na atividade dessa enzima em função da hora do dia foi observada em várias espécies (Meguro & Magalhães, 1982; Oliveira & Pereira-Neto, 1993; Nievola & Mercier, 2001), como também foi verificada alteração na atividade da RN conforme a idade da planta (Smirnoff & Stewart, 1985; Carelli et al., 1990). Em algumas espécies, o sítio principal de redução do nitrato está nas raízes (Queiroz et al., 1993; Oliveira et al., 1996; Delú-Filho et al., 1998), enquanto que, em outras espécies, a maior atividade da RN foi verificada nas folhas (Smirnoff et al., 1984). Estudos realizados com Zn, Cr e Pb mostraram um elevado grau de toxidez, resultando no declínio da atividade da RN, por afetar o grupo SH da enzima (Mathys, 1975; Jain & Garde, 1997; Luna et al., 2000).

Kotze et al. (1977) sugeriram que a toxidez de Al estaria relacionada com o metabolismo do nitrato. É possível que o mecanismo fisiológico da tolerância ao Al esteja associado com a tolerância ao amônio. Isto porque as espécies tolerantes ao Al desenvolveram algum mecanismo de adaptação às condições de solos ácidos, onde o amônio é a forma de nitrogênio predominantemente disponível para as plantas (Gigon & Rorison, 1972).

Com relação ao efeito do Cd sobre as plantas, verificou-se diminuição das taxas fotossintéticas e da atividade da nitrogenase (Huang et al., 1974) e diminuição nos conteúdos de clorofila e carotenóides (Lagriffoul et al., 1998). Além disso, o Cd altera as taxas de absorção líquida de CO₂, a transpiração, a eficiência do uso de água e a condutância estomática (Prasad, 1995).

Uma alternativa viável para avaliar o comportamento fotossintético das plantas é a realização de estudos sobre a fluorescência da clorofila. Estes estudos

podem relacionar alterações na relação da fluorescência variável com a fluorescência máxima (Fv/Fm), em função de estresse ambiental. Santos (1996), estudando *Theobroma cacao* infectado com *Crinipellis pernicioso*, observou queda na relação Fv/Fm. Lima (1998), trabalhando com plantas de seringueira, observou um declínio na relação Fv/Fm, porém, como consequência, as taxas fotossintéticas foram mantidas. Segundo Van Wijk & Krause (1991), decréscimo em Fm sem alteração de Fo é possível devido a incrementos na dissipação de energia térmica por centros de reação inativos do PSII.

O sistema radicular é o principal órgão de contato entre as plantas com os elementos químicos presentes no solo e, quando interceptados pelas raízes entram no apoplasto e podem ser transportados para o interior da célula via apoplasto ou ligados permanentemente a substâncias de carga negativa da parede celular. Barceló & Poschenrieder (1992) resumiram os principais efeitos da toxidez por Zn, Cd, Al, Cu e Pb na estrutura interna e na morfologia das raízes de plantas indicando redução do seu alongamento, danos nas suas extremidades, redução do número de raízes absorventes, redução na biomassa radicular, aumento ou redução das raízes laterais, aumento da suberização e lignificação, redução no diâmetro dos vasos e alterações estruturais da hipoderme e endoderme. Esses mesmos autores relatam que o efeito tóxico dos íons no sistema vascular (xilema e floema) das plantas foi pouco estudado, com indicações da redução do diâmetro dos vasos do xilema em concentrações tóxicas de Cd, Zn, Al e Cr e com o Pb induzindo o aumento da frequência dos vasos no protoxilema de raízes jovens de milho.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material vegetal e condições de cultivo

Este estudo foi conduzido no período de março de 2005 a janeiro de 2006, em casa de vegetação do Departamento de Biologia/Fisiologia Vegetal da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, MG. Este município fica localizado na região sul do estado de Minas Gerais, a 918m de altitude, latitude 21°14'S e longitude 45°00'W GRW. A temperatura média anual do ar da região é de 19,4°C e as médias anuais de temperatura do ar, máxima e mínima, são de 26,1°C e 14,8°C, respectivamente, com precipitação anual de 1.529,7 mm (Brasil, 1992). Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Cwa, apresentando duas estações definidas: seca, de abril a setembro e chuvosa, de outubro a março.

As plantas de seringueira utilizadas foram obtidas a partir de sementes provenientes da fazenda Água Milagrosa em São Paulo, que foram colocadas para germinar em um tanque com solo e areia lavada, cobertas com sombrite e irrigadas duas vezes ao dia. Aos 30 dias após a germinação, as plântulas foram transplantadas para vasos com capacidade para 8,0 litros, pintados externamente de alumínio, de maneira a impedir a entrada de luz, com isso evitando a proliferação de algas. Os vasos continham solução nutritiva de Bolle-Jones (1957) (Tabelas 1 e 2), a 1/5 da força. À medida que ocorria diminuição do volume da solução, devido à evapotranspiração, foi feita reposição com água destilada, completando-se novamente o volume inicial. No decorrer do experimento, a cada 28 dias, a força da solução, ou seja, concentração do nutriente, foi aumentada para 1/3, 1/2 e força total. O pH das soluções foi mantido a $5,5 \pm 0,5$, ideal para cultivo hidropônico, durante o período

experimental, com exceção da solução de Al, cujo pH foi mantido em $4,0\pm 0,5$ (Souza, 1991). As trocas das soluções foram feitas periodicamente, quando a condutividade elétrica atingia $60\pm 10\%$ da concentração inicial utilizada, em torno de dez dias.

As plantas foram mantidas, durante 120 dias, em solução nutritiva completa.

3.2 Aplicação de metais pesados

Após 120 dias em solução completa, as mudas foram submetidas aos tratamentos (Tabela 3) que consistiram na aplicação, em concentrações crescentes, de cádmio (Cd), níquel (Ni), zinco (Zn) e alumínio (Al).

As concentrações de Cd, Ni e Zn foram definidas com base no comportamento de mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e ipê-roxo [*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.], em experimentos realizados por Paiva (2000) e por um experimento teste, realizado seis meses antes da implantação do experimento propriamente dito, com mudas de seringueira. Em virtude dos resultados observados, foram aplicadas, neste experimento, doses 3 vezes maiores de Cd e 3 vezes menores de Ni e Zn. Ao passo que as concentrações de Al foram definidas considerando-se o comportamento de mudas de seringueira em experimento realizado por Souza (1991).

TABELA 1 Fontes, molaridade, solução estoque e composição final da solução nutritiva de Bolle-Jones (1957) utilizada para a condução dos experimentos

Fonte/Solução Estoque	Molaridade	mL L ⁻¹	Concentração (ppm)
NaH ₂ PO ₄	1M	1	31 de P
Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	1M	2	80 de Ca
KNO ₃	1M	1	117 de K
K ₂ SO ₄	0,5M	2	30 de Mg
MgSO ₄	0,5M	2,5	120 de S
(NH ₄) ₂ SO ₄	1M	1,5	112 de N
Solução A*		1	
Fe - EDTA		1	

* Solução A consiste em dissolver, separadamente, misturar e completar para 1L: 0,4122g de H₃BO₄; 1,98g de MnCl₂; 0,24968g de CuSO₄.5H₂O; 0,0431g de MoO₃; 0,28755g de ZnSO₄.7H₂O.

TABELA 2 Composição da solução de Bolle-Jones (mg L⁻¹)

Fonte	Concentração (mg L ⁻¹)
Na ⁺	1
NH ⁴⁺	3
NO ³⁻	5
H ₂ PO ⁴⁻	1
K ⁺	3
Ca ⁺⁺	4
Mg ⁺⁺	2,5
SO ₄ ⁻⁻	7,5

TABELA 3 Concentrações e fontes de metais pesados utilizados nos tratamentos

Metal	Concentração (ppm)	Concentração (μM)	Fonte
Cádmio	0; 30; 45 e 60	0, 270, 400 e 530	$\text{CdCl}_2 \cdot 2,5 \text{H}_2\text{O}$
Níquel	0; 1,7; 3,3 e 5,0	0, 29, 56 e 85	$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Zinco	0; 16,6; 25 e 33,3	0, 250, 380 e 510	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Alumínio	0, 28; 48 e 96	0, 1000, 1800 e 3600	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$

Na preparação de todas as soluções estoques, dos nutrientes e dos metais pesados estudados, empregaram-se reagentes p.a. A solução nutritiva foi preparada utilizando-se água deionizada e, durante o intervalo de renovação da solução, o volume dos vasos foi completado, sempre que necessário, utilizando-se também água deionizada.

As plantas foram mantidas por 120 dias em exposição aos metais, com renovação da solução nutritiva a cada 10 dias. Quando era observada a ocorrência de sintomas drásticos de toxidez, procedeu-se a colheita das mesmas, separando-as em raiz, caule e folha.

3.3 Análise do crescimento

Após a aplicação dos metais, foram marcadas duas folhas no estágio B, recém-lançadas, de cada tratamento, que foram acompanhadas, diariamente, por meio da medição do comprimento e da largura foliar até valor constante, utilizando-se de uma régua milimetrada (Miguel, 2005). Fez-se, também, a marcação de uma planta de cada repetição e procedeu-se ao acompanhamento do crescimento da raiz e da parte aérea, por meio da medição do comprimento.

3.4 Avaliações do porômetro

Após 120 dias da aplicação dos metais, no mês de dezembro de 2005, foram realizadas avaliações de características biofísicas, utilizando-se um porômetro (Steady State Porometer, LICOR 1600), às 9 horas (hora solar), sendo avaliadas as características resistência estomática e transpiração.

Essas avaliações foram feitas em dias típicos, ou seja, claros, sempre em folhas completamente expandidas, na face abaxial das mesmas.

3.5 Quantificação de metais pesados e teor de N, P, K, Ca, Mg e S

Após 120 dias de exposição aos metais, procedeu-se a coleta do material vegetal que foi separado em raiz, caule e folha. As folhas foram devidamente lavadas em água corrente e, em seguida, o material foi levado para pesagem da matéria fresca e, depois submetido à secagem em estufa a 70°C, até peso constante e obtido o peso. Posteriormente, foi efetuada, no Laboratório de Solos da Universidade Federal de Lavras, uma digestão nítrico-perclórica do material para a determinação dos teores de Cd, Ni, Zn, Ca, Mg, por espectrometria de absorção atômica; de K, por fotometria de chama; de P, por colorimetria; de S, por turbidimetria e de N, pelo método de Kjeldahl (N total). Para a determinação do teor de Al foi utilizado o método da aluminona por espectrofotometria em $\lambda = 525$ nm.

3.6 Eficiência fotoquímica do fotossistema II

A fluorescência da clorofila *a* foi avaliada por meio de um fluorômetro portátil (**Plant Efficiency Analyser- Hansatech, King's Lynn, Norfolk, UK**). A eficiência fotoquímica do fotossistema II (PSII), ou seja, a razão F_v/F_m , em que $F_v = F_m - F_o$, F_m = fluorescência máxima; F_v = fluorescência variável e F_o =

fluorescência mínima, foi estimada à temperatura ambiente, em folhas adaptadas, a 30 minutos de escuro. As avaliações foram realizadas em folhas completamente expandidas, em dias claros, a partir das 10 horas da manhã.

Foram realizadas quatro avaliações, no período de outubro a novembro de 2005, em uma folha por planta, com três repetições por tratamento.

3.7 Atividade da redutase do nitrato (RN)

Para avaliar a atividade da redutase do nitrato (RN) 30, 60 e 90 dias após indução (DAI) dos tratamentos, foram pesados 500 mg de raízes laterais, as quais foram transferidas para béqueres de 20 mL contendo 5mL de um meio de incubação contendo tampão fosfato de potássio 0.1 M pH 7.5; 100 mM de KNO_3^- e 5% de n-propanol (v/v), que foram submetidos à infiltração a vácuo, durante um minuto, por duas vezes. Após esse procedimento, os béqueres foram colocados em banho-maria, a 30°C, com agitação no escuro e, em seguida, alíquotas de 500 μL foram retiradas aos 10 e 70 minutos, respectivamente, adicionando-se a um meio de reação constituído por 1 mL de sulfanilamida 1% (p/v) em HCl 1,5 N, 1mL de N-2-naftil etilenodiamino di-HCl 0,02% (p/v) e completado o volume final de 4,0 mL, com 1,5 mL de água destilada. A quantidade de nitrito formado no meio da reação foi determinada colorimetricamente num espectrofotômetro a 540 nm. A atividade da RN será expressa em $\mu\text{mol de NO}_2^- \text{kg}^{-1}$ massa fresca h^{-1} .

3.8 Características anatômicas

Depois de um período de 120 dias de avaliação, após a aplicação dos tratamentos, na área experimental, procedeu-se a coleta de todo material. O mesmo foi separado em raiz, caule e folha e fixado em álcool 70%. Em seguida, procedeu-se a elaboração dos cortes anatômicos utilizando um micrótomo de

mesa. As seções foram clarificadas em solução com hipoclorito de sódio comercial a 20%, por um período que variou de três a cinco minutos e, em seguida, lavadas em água destilada, neutralizadas em água acética a 1%. Posteriormente, os cortes foram corados com uma mistura de azul de astra-safranina (safrablau), seguindo-se os métodos descritos por Bukatsch (1972). As lâminas foram, então, montadas utilizando-se bálsamo-do-canadá (Berlyn & Miksche, 1976).

Na análise e na documentação fotográfica, foi utilizado fotomicroscópio Olympus AX 70, equipado com sistema fotográfico U-Photo, com câmara digital e recurso de contraste de fase e polarização.

Para se avaliar o número médio de estômatos por mm^2 e o diâmetro polar e equatorial (epiderme abaxial), foram realizados cortes paradérmicos, pelo método da dissociação de epidermes, com cloreto de potássio e ácido nítrico. Os cortes foram realizados na região mediana da folha e, em seguida, foram colocados sobre uma lâmina com safranina e água glicerinada. A partir das seções transversais, foram efetuadas medições e observadas com auxílio de uma ocular micrométrica em microscópio. Em seguida, as lâminas foram observadas em microscópio Olympus CBB, segundo técnica de Labouriau et al. (1961). As medições foram realizadas em cinco lâminas, sendo quatro campos de cada uma, totalizando 20 repetições. As fotomicrografias foram obtidas em microscópio Olympus BX60, utilizando programa de computação, no Laboratório de Citologia do Departamento de Biologia da UFLA.

3.9 Delineamento experimental e análises estatísticas

O delineamento foi em blocos casualizados, com quatro tratamentos para cada metal e quatro repetições, sendo cada repetição representada por um vaso com quatro plantas, perfazendo, assim, um total de 16 plantas para cada elemento estudado.

Os resultados foram submetidos à análise de variância por meio do programa estatístico Sisvar, pelo qual foram ajustadas as equações de regressão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Sintomas de fitotoxidez

As concentrações de Cd, Ni, Zn e Al, aplicadas no meio de cultivo, induziram o aparecimento de sintomas acentuados de toxidez, tanto na parte aérea quanto na raiz.

Sete dias após aplicação dos metais, observou-se que o Cd promoveu amarelecimento com clorose, seguida de necrose na ponta das folhas (Figura 1). Quando presente, mesmo em baixas concentrações, no substrato de crescimento das plantas, o Cd pode causar clorose e necrose nas suas folhas, em consequência da inibição do desenvolvimento dos tecidos, assim como pela alteração do balanço nutricional das plantas expostas ao metal (Nascimento et al., 1998).

O Ni promoveu clorose seguida de necrose nas pontas das folhas mais velhas, clorose na lâmina foliar, enrugamento em folhas jovens e velhas e o lançamento apresentava enrugamento e murcha (Figura 2). Além disso, o Ni provocou o aparecimento de deficiência induzida de Fe logo nos primeiros dias após a aplicação, ficando o sintoma cada vez mais pronunciado.

No tratamento com Zn, verificaram-se clorose e necrose nas bordas e nas pontas das folhas velhas e amarelecimento na lâmina foliar como um todo, seguida de clorose e necrose (Figura 3). Como observado para o Ni, o Zn também provocou o aparecimento de sintoma de deficiência induzida de Fe.

No tratamento com Al verificou-se início de clorose, seguida de necrose nas pontas das folhas e, em seguida, as folhas secaram e caíram (Figura 4). A ocorrência de clorose e de necrose pode estar relacionadas com a deficiência múltipla de vários elementos que participam da formação, multiplicação e

funcionamento de cloroplastos, ou na síntese de clorofila (Breckle & Kahle, 1992; Marques, 1996).

Foi observado efeito drástico nas raízes (Figura 5) sob a influência das concentrações de Cd, Ni, Zn e Al, tendo o Zn promovido encurtamento e engrossamento das raízes secundárias. A ação de metais pesados na formação de pêlos radiculares e raízes secundárias é visível na fase inicial de desenvolvimento. Isso pode reduzir a capacidade da planta de se fixar no substrato e de absorver nutriente (Kahle, 1993).

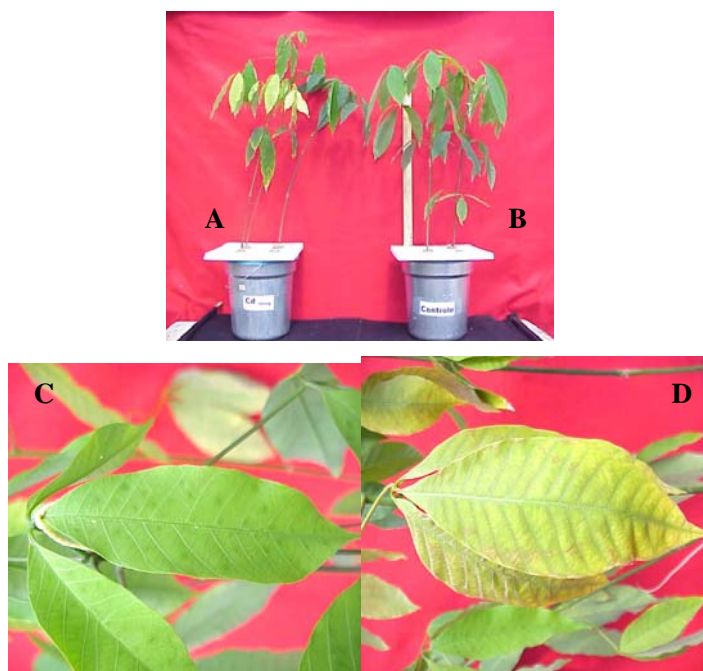


FIGURA 1 Sintomas de toxidez de Cd: A (Cd 270 μ M), B (controle), C (Cd 400 μ M) e D (Cd 530 μ M)

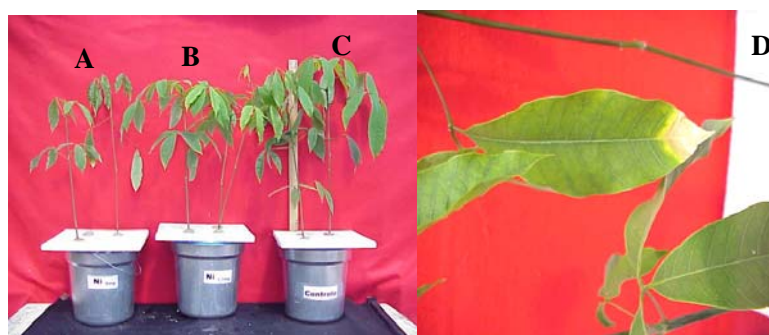


FIGURA 2 Sintomas de toxidez de Ni: A (Ni 29 μ M), B (Ni 56 μ M), C (controle) e D (Ni 85 μ M)

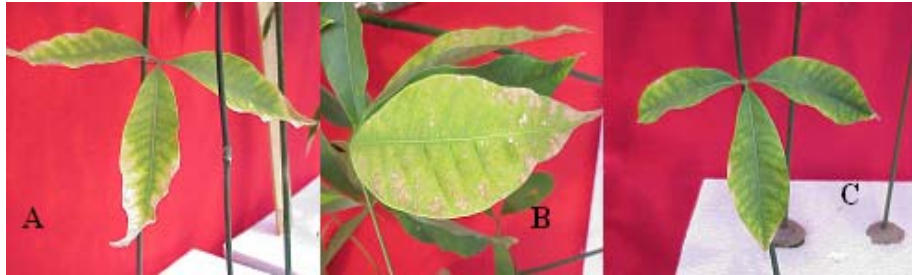


FIGURA 3 Sintomas de toxidez de Zn: A (250 μ M), B (380 μ M), C (510 μ M).



FIGURA 4 Sintomas de toxidez de Al: A (1000 μ M), B (1800 μ M), C (control), D (3600 μ M), E (1800 μ M) e F (control).

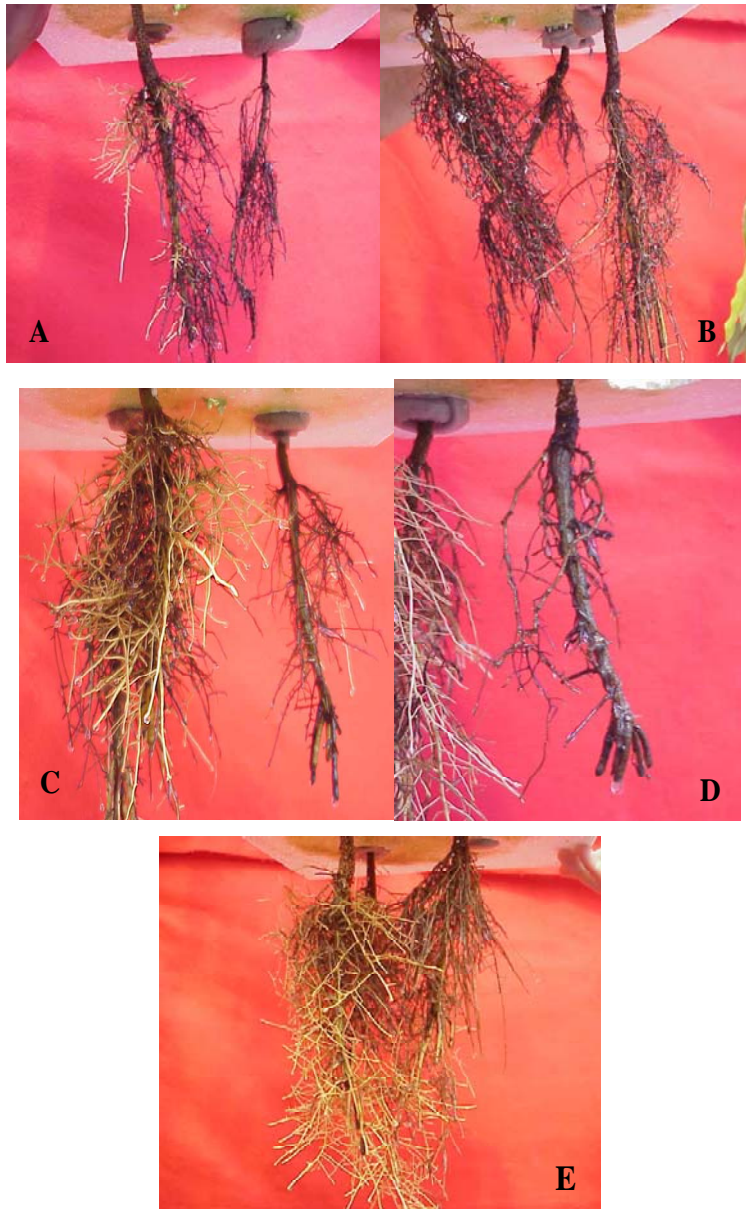


FIGURA 5 Sintomas de toxidez de Cd, Ni, Zn e Al nas raízes de plântulas de seringueira. A (Cd 400 μ M); B (Ni 56 μ M Al 48 μ M); C(Zn 510 μ M Ni 56 μ M); D(Al 1800 μ M) e E (controle)

4.2 Efeito dos metais no crescimento de plantas de seringueira

O aumento das concentrações de Cd, Ni, Zn e Al, na solução nutritiva, exerceu efeitos significativos sobre as características vegetativas que envolvem o crescimento foliar (comprimento e largura) e o crescimento da raiz e da parte aérea (comprimento). O efeito dos metais, em diferentes concentrações, sobre o comprimento e a largura foliar é mostrado nas Figuras 6 e 7, respectivamente. Nas maiores concentrações de Ni, Zn e Al, observou-se menor comprimento e largura foliar. Já para o Cd, o comprimento e a largura foliar sofreram redução de pequena magnitude com o aumento da concentração, embora significativo, do ponto de vista estatístico. Soares et al. (2001), trabalhando com eucalipto, observaram redução de 94% na relação entre comprimento e largura foliar, quando submetido à concentração de 180 μM de Cd, um valor muito abaixo do menor valor utilizado no presente trabalho que foi de 270 μM .

O comprimento e a largura foliar, em diferentes concentrações de metais, além do valor superestimado da área foliar são mostrados na Tabela 4. Observou-se que apenas o tratamento com Cd não induziu redução na área foliar superestimada, entretanto, os demais metais induziram uma redução de grande magnitude.

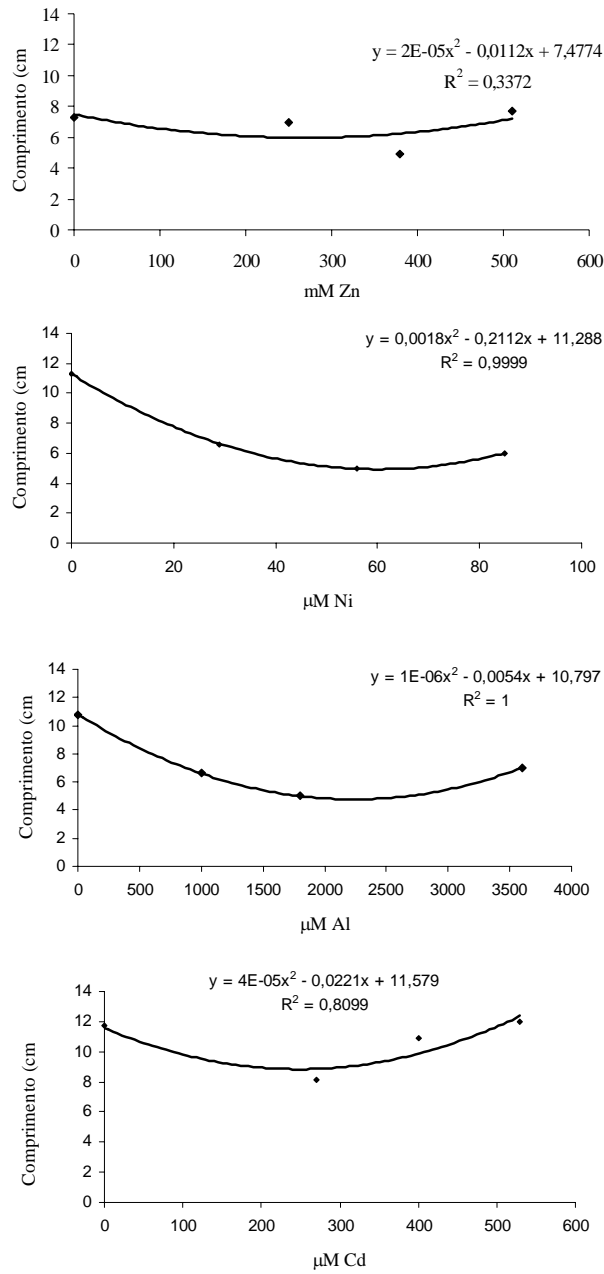


FIGURA 6 Comprimento foliar (cm) de plantas de seringueira submetidas a diferentes concentrações em μM de Zn (0, 250, 380, 510), Ni (0, 29, 56, 85), Al (0, 1000, 1800, 3600) e Cd (0, 270, 400, 530), em solução nutritiva.

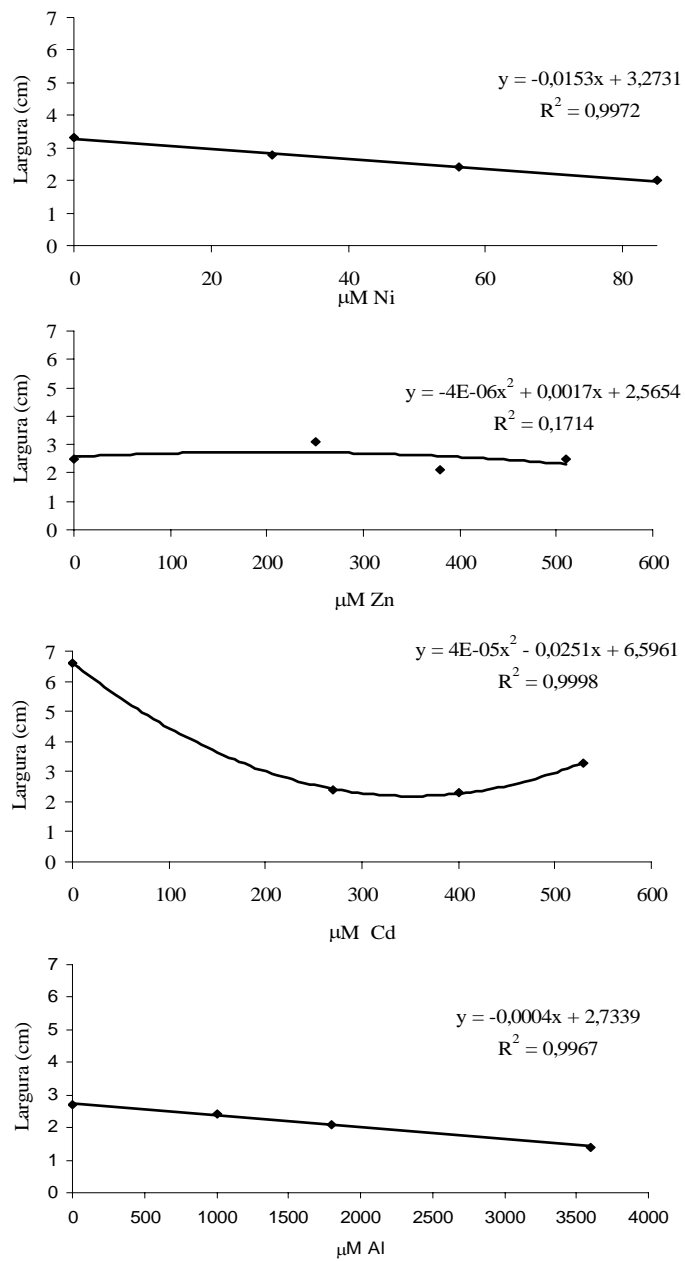


FIGURA 7 Largura foliar (cm) de plantas de seringueira, submetidas a diferentes concentrações em μM de Ni (0, 29, 56 e 85), Zn (0, 250, 380 e 510), Cd (0, 270, 400 e 530) e Al (0, 1000, 1800 e 3600), em solução nutritiva.

TABELA 4 Valores médios do comprimento e largura foliar de plantas de seringueira, após a aplicação dos metais em diferentes concentrações, e o cálculo superestimado da área foliar.

	Concentração (μM)	Comprimento (cm)	Largura (cm)	Área foliar superestimada (cm^2)
Cd	0	11,6	2,9	33,4
	270	8,9	2,3	20,5
	400	9,9	2,4	23,8
	530	12,4	2,8	34,7
Ni	0	10,7	3	32,1
	29	8,7	2,4	20,9
	56	7	2,1	14,7
	85	5	2,1	10,5
Zn	0	7,5	4	30
	250	6	3,1	18,6
	380	6,3	2,1	13,2
	510	7,2	2,5	18
Al	0	7,4	3	22,2
	1000	5,3	2,2	11,7
	1800	4,4	1,8	7,9
	3600	5	1,5	7,5

O efeito das concentrações dos metais sobre o crescimento da raiz e da parte aérea está evidenciado na Figura 8. Verificou-se redução de 75% na matéria seca de parte aérea (MSPA) com a aplicação de 180 μM Cd. Paiva et al. (2001), trabalhando com *Cedrela fissilis* Vell, na concentração de 132 μM , encontraram redução na matéria seca de raiz (MSR), matéria seca de caule (MSC) e matéria seca de folha (MSF), de 88%, 76% e 88%, respectivamente. Os resultados encontrados no presente trabalho mostram que a seringueira possui maior tolerância a elevadas concentrações de Cd.

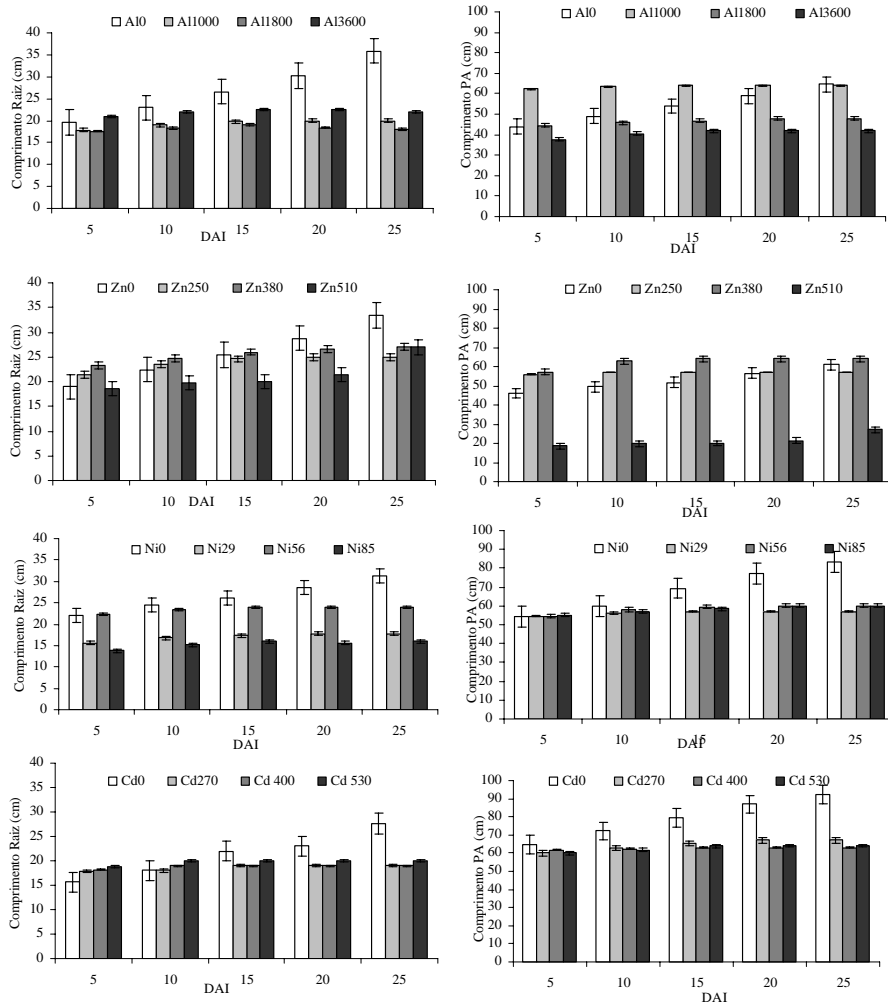


FIGURA 8 Crescimento da raiz e da parte aérea (PA) de plantas de seringueira em resposta a concentrações em μM de Al, Cd, Ni e Zn em solução nutritiva. Cada barra corresponde à média (\pm erro padrão).

A aplicação de Ni levou à redução na produção da MSR, MSC MSF e MSPA, sendo que a redução da MSR foi mais acentuada (Figura 9) nas três concentrações aplicadas. Observou-se que, para a MSR, as concentrações de 29 μM e 85 μM reduziram em 72% e 87%, respectivamente, a produção de matéria seca. Palácios et al. (1998), estudando o efeito fitotóxico do Ni em tomate, observaram que houve redução de 15% e de 27%, na MSR e MSF, respectivamente, quando submetido a 85 μM de Ni. Yang et al. (1996) observaram, em plantas de milho, redução de 20% em MSR submetida à Ni, na concentração de 60 μM . Trabalhos realizados com *Cedrela fissilis* Vell (Paiva, 2000), arbórea, em alta concentração de Ni (252 μM), mostraram redução de 72% na MSR. Com isso, comprova-se a baixa tolerância da seringueira ao Ni.

As concentrações de Zn proporcionaram redução de grande magnitude para a produção de MSR, MSC, MSF e MSPA (Figura 9). Na menor concentração aplicada (250 μM), houve redução de 47% e de 36% e, na maior concentração (510 μM), a redução foi de 84% e de 71%, para a MSF e MSPA, respectivamente. Na concentração de 250 μM , o Zn reduziu a MSR em torno de 83%. Soares (1999) observou redução de 79% e de 97%, em MSPA e MSR, respectivamente, para *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus maculata*, utilizando concentração de 1.600 μM Zn, confirmando o forte efeito do Zn sobre o crescimento do sistema radicular.

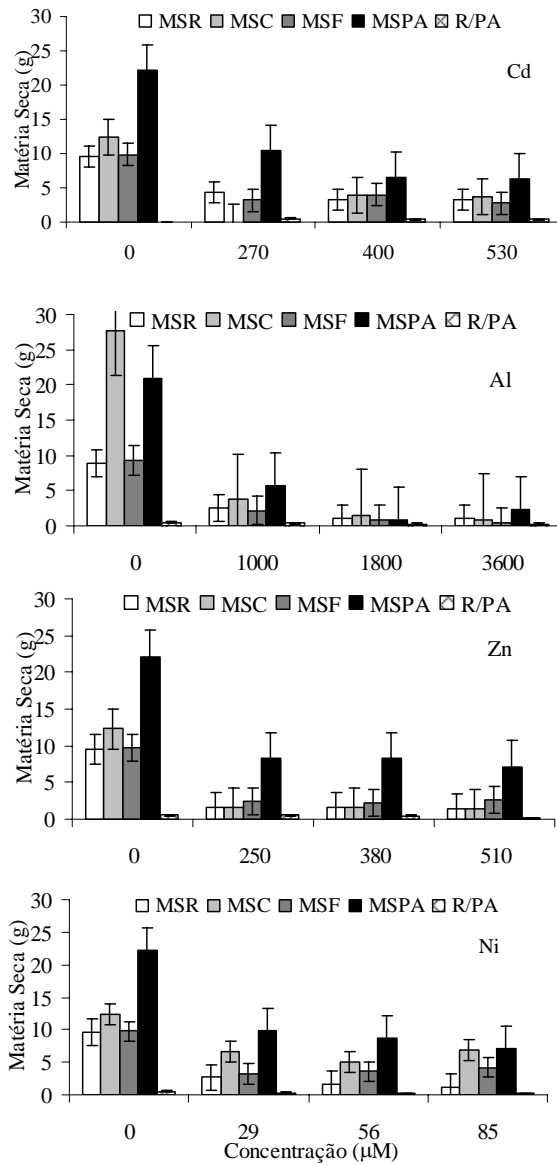


FIGURA 9 Matéria seca de raiz (MSR), caule (MSC), folha (MSF) e parte aérea (MSPA) e relação R/PA de mudas de seringueira em resposta a concentrações em µM de Cd, Al, Zn e Ni em solução nutritiva. Cada barra corresponde à média (\pm erro padrão).

As concentrações de Al proporcionaram redução de grande magnitude sobre a produção de MSR, MSC, MSF, MSPA (Figura 9). Todas as concentrações aplicadas reduziram significativamente a matéria seca da planta de seringueira. Na menor concentração (1.000 μM), a redução de matéria seca de raiz foi em torno de 90%. Entretanto, Souza (1991), estudando o efeito do alumínio em seringueira, verificou que a produção de matéria seca não foi influenciada nas concentrações de 300 μM , 593 μM e 1.186 μM de Al. Conforme o autor, isso pode ser atribuído ao fato de o experimento ter durado apenas cinquenta dias e por ser a cultura de seringueira perene e de crescimento lento.

4.3 Resistência estomática, transpiração e eficiência fotoquímica do fotossistema II

As características avaliadas foram obtidas no final do experimento, mais especificamente no mês de dezembro de 2005, quando foi observada, para a radiação fotossinteticamente ativa, variação que compreendeu valores na faixa de 100 a 400 $\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$, em todos os tratamentos.

Pode-se observar que, para a característica de resistência estomática (Figura 10), os tratamentos com adição crescente das concentrações dos metais pesados Cd, Ni e Al apresentaram tendência de aumento dos valores em comparação ao controle. Esse comportamento não foi observado para as plantas submetidas ao tratamento com o Zn, que apresentaram maiores valores na primeira concentração utilizada (16,6ppm), diminuindo à medida que essa concentração foi aumentada.

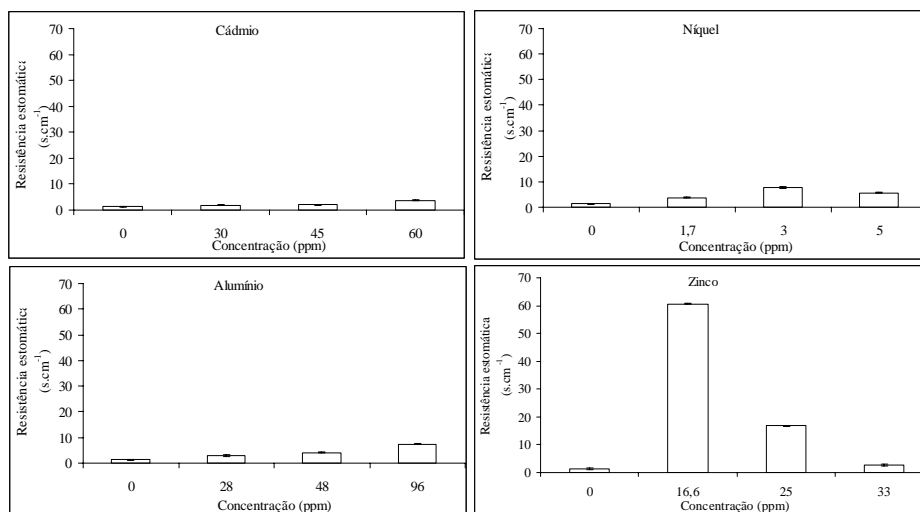


FIGURA 10 Variação da resistência estomática ($s.cm^{-1}$), de plântulas de seringueira submetidas a diferentes concentrações em ppm de Cd, Ni, Zn e Al, em solução nutritiva (As barras em cada coluna indicam o erro padrão da média de três repetições).

Os valores de transpiração, observados na Figura 11, seguem padrões de valores opostos àqueles da resistência estomática.

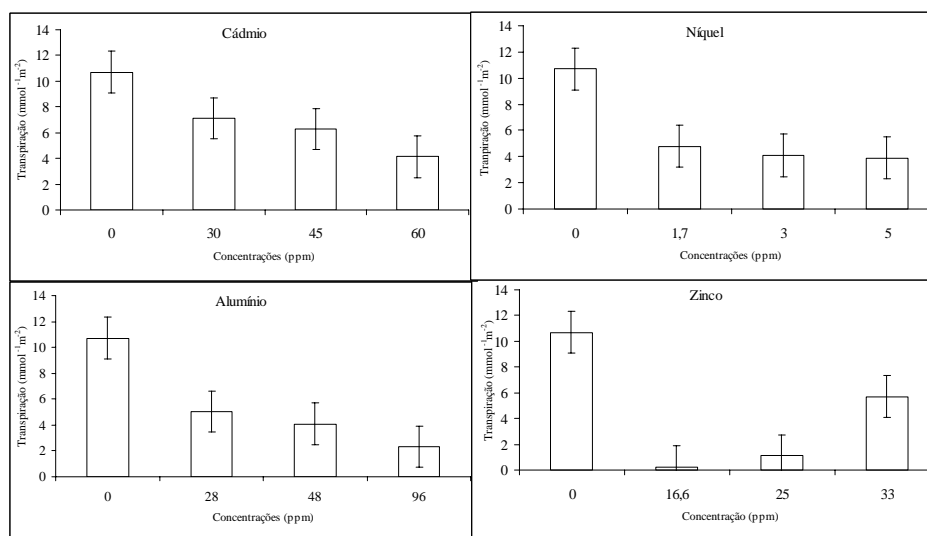


FIGURA 11 Variação da transpiração ($\text{mmol}^{-1}\text{m}^{-2}$) de plântulas de seringueira submetidas a diferentes concentrações em ppm de Cd, Ni, Zn e Al, em solução nutritiva (As barras em cada coluna indicam o erro padrão da média de três repetições).

Não foi avaliado o potencial hídrico das plantas, devido ao fato de as mesmas estarem submetidas ao cultivo hidropônico. Contudo, um ponto que deve ser relatado é que, quando foi realizada a contagem de estômatos nos tratamentos, foi observada redução na quantidade, em função da aplicação do metal pesado (Tabela 5).

Na Tabela 5 estão representadas as concentrações de cada metal, na ordem crescente, e os respectivos números de estômatos para cada concentração. Não foram verificadas diferenças significativas no número de estômatos entre os metais. No entanto, observam-se, na Tabela 5, diferenças significativas, relativas ao número de estômatos dentro de cada tratamento. Ou seja, observou-se redução no número de estômatos à medida que se aumentava a concentração do metal. O número de estômato encontrado neste trabalho é muito

inferior ao encontrado por Miguel (2005), pois o mesmo trabalhou com plantas adultas do jardim clonal.

TABELA 5 Número de estômatos de plantas de seringueira, submetidas a diferentes concentrações de Cd, Ni, Zn e Al, em condições de casa de vegetação. Lavras, MG, 2005-2006.

	Concentração (μM)	Nº estômatos	CV (%)
Cd	0	56A	17,97
	270	37B	
	400	27C	
	530	23C	
Ni	0	56A	15,88
	29	32C	
	56	31C	
	85	23C	
Zn	0	55A	21,14
	250	43B	
	380	43B	
	510	39B	
Al	0	28C	17,56
	1000	28C	
	1800	28C	
	3600	27C	

¹Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna, para a mesma variável, não diferem entre si, pelo Teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Samsuddin & Impens (1978 a e b) verificaram que em folhas jovens de seringueira, os estômatos ainda não estão funcionais e, morfológicamente, as estruturas internas dos folíolos apresentam compactação, dificultando a perda de água.

Os resultados da relação entre fluorescência variável e máxima (F_v/F_m), nas diferentes concentrações de Cd, Ni, Zn e Al encontram-se na Figura 12. Verifica-se que houve aumento desta variável com o aumento das concentrações dos metais.

Os valores permaneceram entre 0,65 e 0,8. O aumento nos valores de Fv/Fm, segundo Baker et al. (1984), demonstra a grande quantidade de moléculas de clorofila incapazes de transferir a energia de excitação para os centros de reação de PSII. Em contrapartida, diminuição nos valores de Fv/Fm indica um declínio na eficiência fotoquímica de PSII (Demmig & Björkman, 1987).

A razão Fv/Fm é considerada uma forma de medir a utilização da energia radiante absorvida na fotossíntese.

Para um grande número de espécies, a relação, Fv/Fm varia entre 0,800 e 0,833 (Björkman & Demmig, 1987). Segundo Siffer et al. (1988), os valores elevados desta razão significam melhoria na utilização de energia radiante absorvida e elevação das reações do ciclo de Calvin. De acordo com Bolhar-Nordenkamp et al. (1989), os valores de Fv/Fm entre 0,75 e 0,85 são característicos de plantas não estressadas. Entretanto, os resultados apresentados nesta Figura vão contra esta afirmação, uma vez que a elevação está associada ao estresse pelo metal pesado.

Observou-se redução nesta variável no tratamento com Al na concentração de 3600 μM e aumento no tratamento com Cd na concentração de 530 μM . Não houve diferença na variável da fluorescência para os tratamentos com Ni e Zn (Figura 12). Entretanto, os valores de Fv/Fm foram um pouco inferiores aos encontrados por alguns autores. Estes valores mais baixos de Fv/Fm encontrados devem-se, possivelmente, a um maior aumento de Fo em relação a Fm, que implica na redução de Fv. Estudos realizados por Miguel (2005) mostraram, em alguns clones de seringueira, cultivados em condição de campo, valores de Fv/Fm em torno de 0,75, os quais estão próximos aos encontrados neste presente trabalho. Menores valores na relação Fv/Fm, possivelmente, se devem a um maior aumento de Fo em relação à Fm, implicando em redução de Fv.

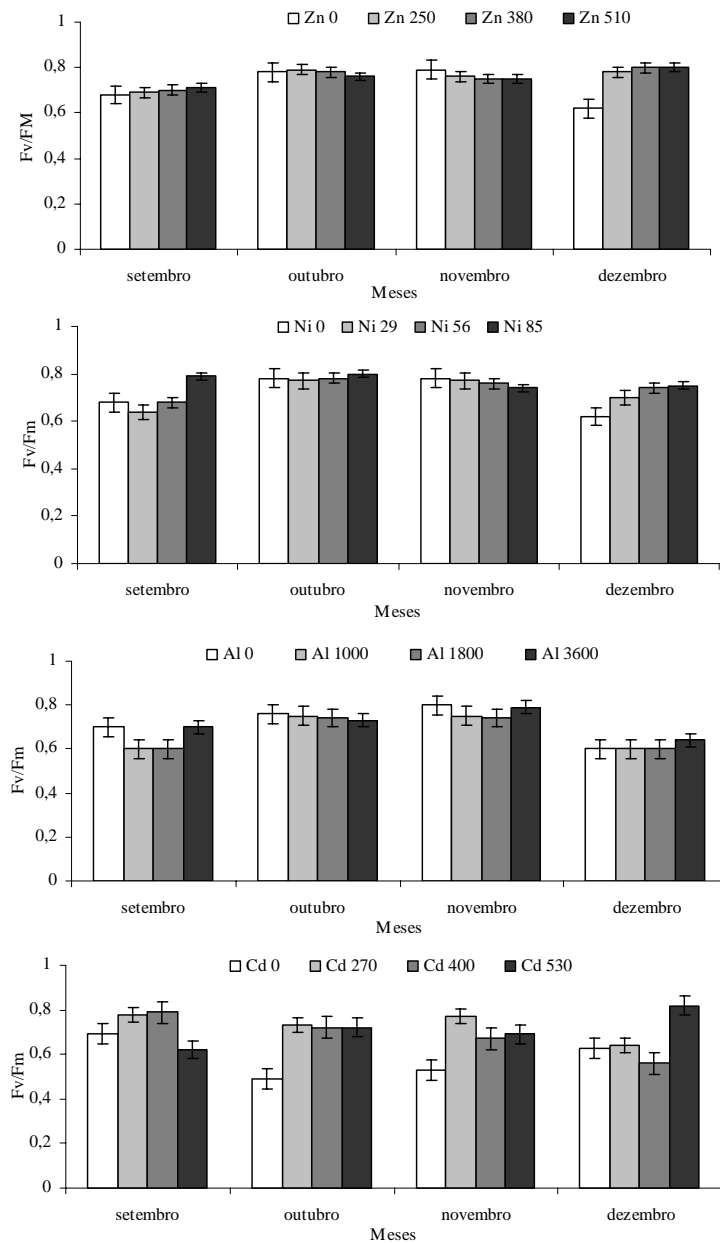


FIGURA 12 Variação da fluorescência da clorofila, de plântulas de seringueira, submetidas a diferentes concentrações em μM de Cd (0, 270, 400 e 530), Ni (0, 29, 56 e 85), Zn (0, 250, 380 e 510) e Al (0, 1000, 1800 e 3600), em solução nutritiva (As barras em cada coluna indicam o erro padrão da média de quatro repetições).

4.4 Teor de metais

A aplicação de concentrações crescentes de Cd, Ni, Zn e Al em plantas de seringueira exerceram efeitos significativos sobre os teores dos mesmos na raiz, no caule e na folha. Observou-se resposta linear positiva para o teor de Cd na raiz, no caule e na folha (Figura 13). O máximo alcançado pelo teor de Cd na raiz das plantas foi de 377 mg kg^{-1} , na dose de $270 \mu\text{M}$; 722 mg kg^{-1} , na dose de $400 \mu\text{M}$ e de 826 mg kg^{-1} , na dose de $530 \mu\text{M}$. Este comportamento confirma resultados anteriores de que a absorção do Cd aumenta com a concentração desse elemento no meio de crescimento (Smith & Brennan, 1984; Oliveira et al., 1994; Soares, 1999). Entretanto, Paiva (2000) observou comportamento diferenciado em mudas de cedro e de ipê-roxo, nas quais o teor foi bem mais elevado em raízes com doses menores do que as utilizadas neste trabalho.

O teor de Cd no caule e nas folhas alcançou valores máximos, respectivamente, de 332 mg kg^{-1} e 142 mg kg^{-1} , na concentração de $530 \mu\text{M}$. Este aumento no teor de Cd, no caule e na folha indica o elevado potencial de translocação desse elemento (Paiva et al., 2001). Alguns trabalhos de diferentes autores mostraram este mesmo resultado (Guo & Marschner, 1995; Arduini et al., 1996; Soares, 1999). Os altos teores de Cd na raiz, no caule e na folha podem ser os responsáveis pelo alto nível de toxicidade deste elemento (Smith & Brennan, 1984).

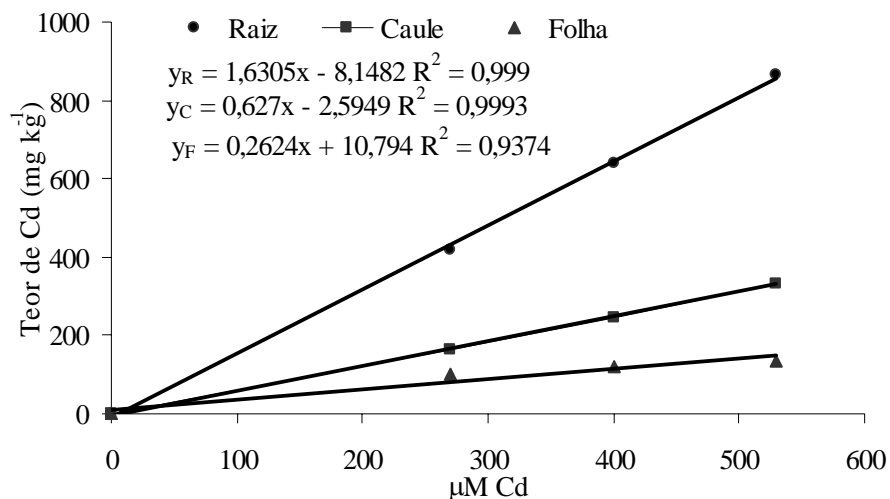


FIGURA 13 Teor de Cd na matéria seca de raiz, caule e folha de seringueira, submetidas a diferentes concentrações em μM de Cádmio (0, 270, 400 e 530).

A seringueira mostrou tendência à tolerância às concentrações de Cd aplicadas, uma vez que os teores encontrados na raiz, no caule e na folha são muito inferiores aos encontrados em outras espécies estudadas e em doses muito mais baixas do que as utilizadas neste trabalho (Paiva, 2000).

O incremento nas concentrações de Ni, em solução nutritiva, levou ao aumento no teor deste metal na raiz, no caule e na folha, nas plantas de seringueira (Figura 14). Na raiz, o teor máximo alcançado foi de 437 mg kg^{-1} na dose de $85 \mu\text{M}$. Analisando os dados relativos ao teor de Ni nas folhas, verificou-se teor máximo de 128 mg kg^{-1} , na dose de $85 \mu\text{M}$.

Como observado, houve elevação nos teores de Ni no caule e na folha, comprovando o que se encontra, na literatura, sobre a grande mobilidade desse elemento na planta (Mishra & Kar, 1974). O aumento no teor, independente da parte da planta, mostra que o Ni é absorvido proporcionalmente à concentração do mesmo no meio de crescimento. O teor alcançado na raiz, no caule e na folha desta espécie estudada é muito superior ao teor considerado tóxico para plantas,

podendo, então, ser a explicação para o elevado grau de toxicidade deste metal. Segundo Adriano (1986), a expressão da toxidez de Ni ocorre quando sua concentração na matéria seca das plantas for maior que 50 mg kg^{-1} , com exceção das espécies acumuladoras e hiperacumuladoras.

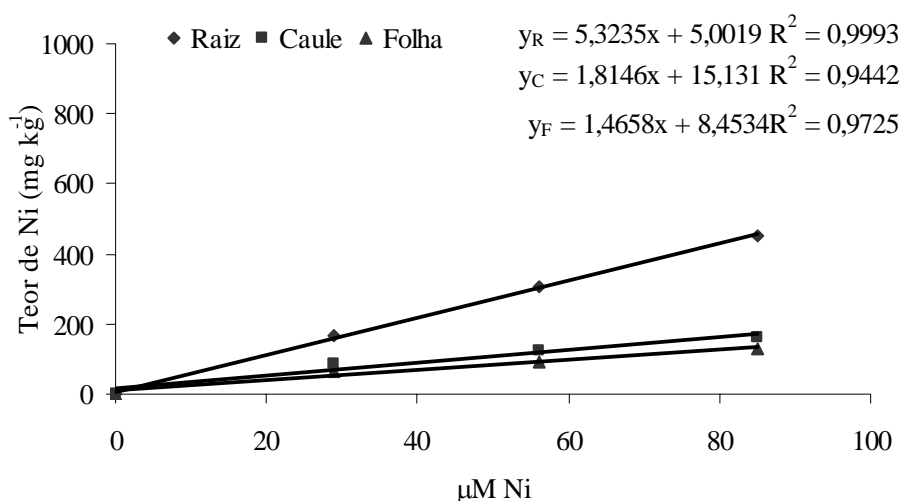


FIGURA 14 Teor de Ni na matéria seca de raiz, caule e folha de seringueira submetida a diferentes concentrações em μM de Níquel (0, 29, 56 e 85).

O teor de Zn (Figura 15) na raiz atingiu o máximo de 608 mg kg^{-1} , na dose de $510 \mu\text{M}$, e de 2.625 mg kg^{-1} , na dose $334 \mu\text{M}$ Zn, em mudas de ipê-roxo (Paiva, 2000). Na folha de seringueira, o teor de Zn atingiu o máximo de 107 mg kg^{-1} , na dose de $510 \mu\text{M}$ (Figura 15). Este teor foliar de Zn está dentro da faixa ainda considerada não tóxica para o crescimento de várias espécies (Kabata-Pendias & Pendias, 1984).

O teor de Al encontrado no caule e na folha foi muito baixo (Figura 16), resultado este que se confirma com o encontrado na literatura (Jarvis & Hatch, 1987; Lindberg, 1990; Souza, 1991), que sugere a pequena mobilidade do Al na planta.

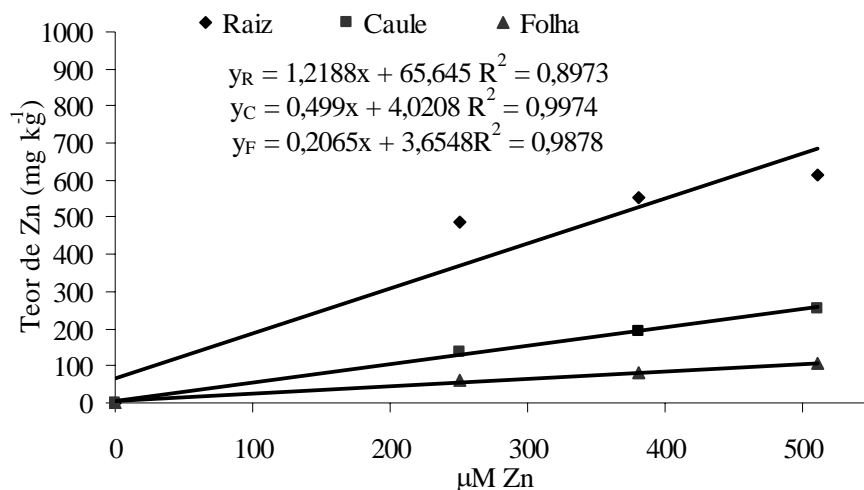


FIGURA 15 Teor de Zn na matéria seca de raiz, caule e folha de seringueira submetida a diferentes concentrações em μM de zinco (0, 250, 380 e 510).

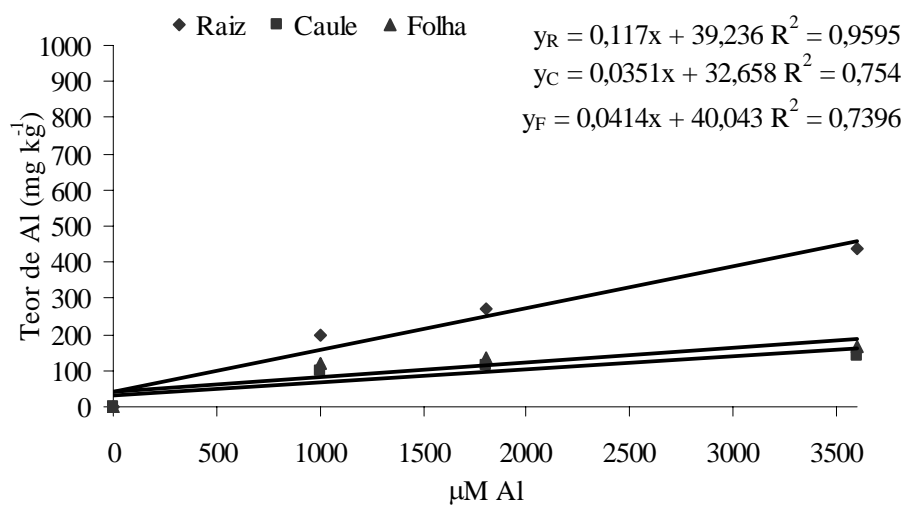


FIGURA 16 Teor de Al na matéria seca de raiz, caule e folha de seringueira submetida a diferentes concentrações em μM de alumínio (0, 1000, 1800 e 3600).

4.5 Teor de N, P, K, Ca, Mg e S

A aplicação de concentrações crescentes de Cd, Ni, Zn e Al, em plantas de seringueira, exerceu efeitos significativos sobre os teores de N, P, K, Ca, Mg e S (Figuras 17, 18, 19, 20, 21 e 22). Os metais, com exceção do Zn, induziram redução no teor de N na raiz, no caule e na folha; o Zn reduziu o teor de N somente nas folhas (Figura 17). O teor de P foi reduzido na presença de Cd, Ni e Al, e o Zn não alterou o seu teor (Figura 18). É sabido que o Al prejudica a absorção de P, principalmente reduzindo o crescimento do sistema radicular (Foy, 1976). Oliveira & Rena (1989), trabalhando com mandioca, mostraram o efeito do Al bloqueando o crescimento do sistema radicular.

Para o K, não houve efeito significativo do Al sobre o seu teor, entretanto, Cd, Ni e Zn afetaram significativamente sua concentração (Figura 19), acarretando redução no seu teor quando comparado ao controle.

Todos os metais tiveram efeito significativo sobre o teor de Ca na raiz, caule e folha (Figura 20), apresentando o mesmo comportamento de redução no teor do elemento, quando comparado ao controle. Quando se observa o teor de Mg em função da aplicação crescente dos metais pesados (Figura 21), verifica-se redução mais drástica desse nutriente, quando a planta foi mantida na presença do Cd.

Com relação ao S, a aplicação de Cd teve efeito significativo apenas nas raízes, reduzindo seu teor, o Ni reduziu o teor no caule e nas folhas. O Zn não teve efeito significativo sobre o teor de S e o Al provocou um aumento no teor de S nas raízes (Figura 22). Evidentemente, os efeitos dos metais nos tecidos vegetais são mais pronunciados à medida que aumentam as concentrações dos mesmos.

Paiva et al. (2001) mostraram que o Cd promoveu aumento no teor de P, S e Ca, praticamente não afetando o teor de K em mudas de cedro, resultado que

contrária o encontrado neste trabalho com seringueira. Entretanto, Gussarsson et al. (1995) demonstraram que, em mudas de *Bétula pendula*, os teores de K e Ca diminuíram nas raízes e os teores de Ca e P, na parte aérea de mudas de *Bétula pendula*, diminuíram significativamente pelo tratamento com Cd em solução nutritiva. Paiva (2000) observou que a aplicação de Cd reduziu os teores de P, K, Ca e Mg na raiz de ipê-roxo, ao passo que o teor foliar desses macronutrientes não foi afetado pela presença desse metal pesado.

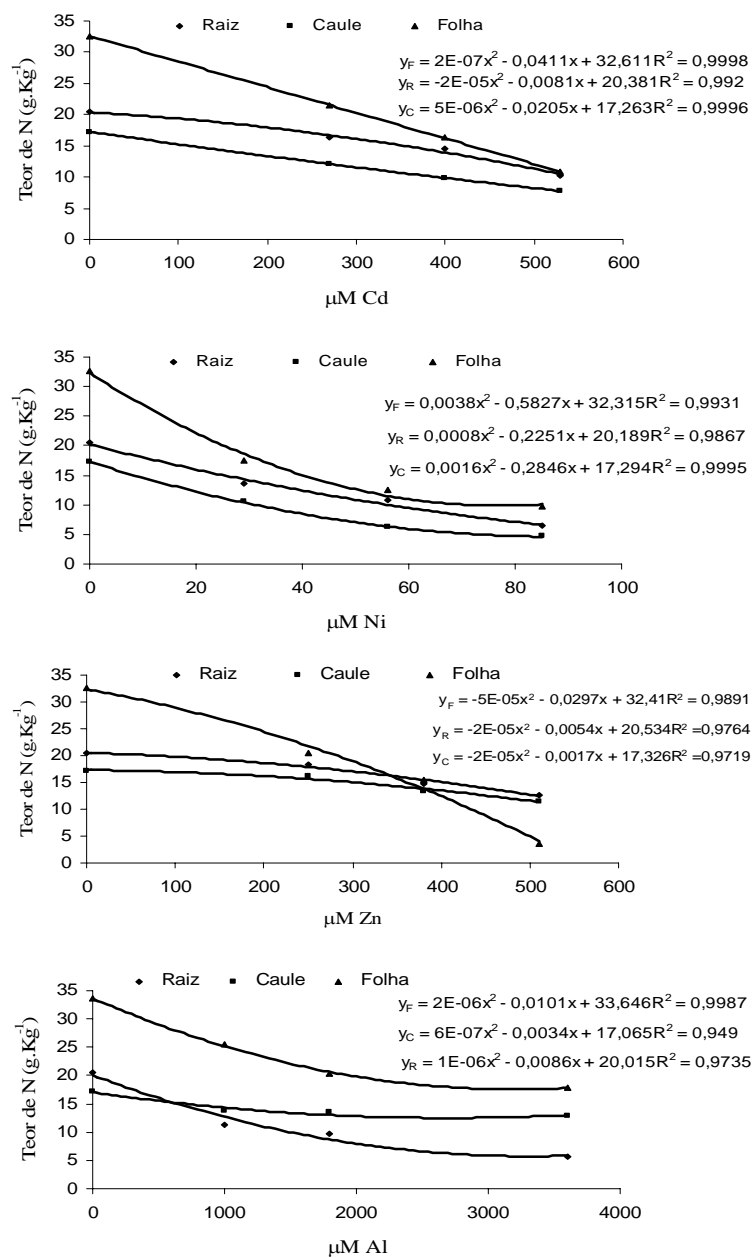


FIGURA 17 Teor de N na matéria seca de raiz, caule e folha de seringueira, submetida a diferentes concentrações em μM de Cd (0, 270, 400 e 530), Ni (0, 29, 56 e 85), Zn (0, 250, 380 e 510) e Al (0, 1000, 1800 e 3600).

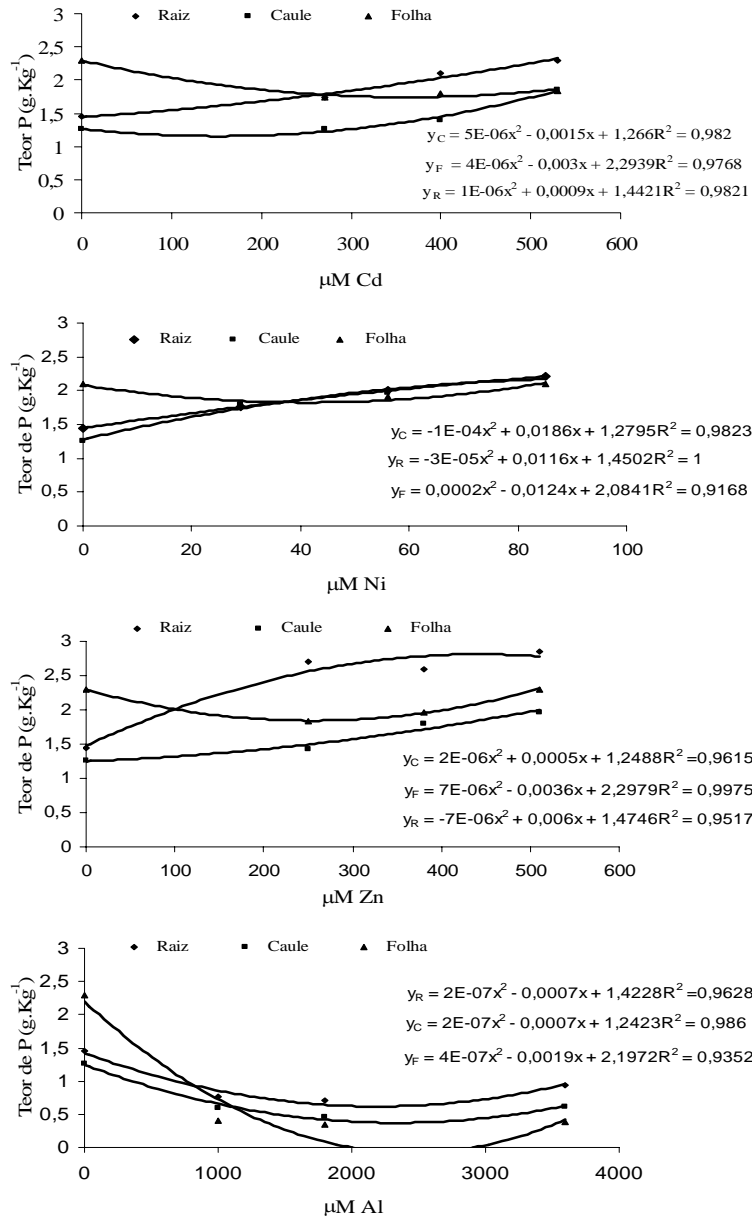


FIGURA 18 Teor de P na matéria seca de raiz, caule e folha de seringueira, submetida a diferentes concentrações em μM de Cd (0, 270, 400 e 530), Ni (0, 29, 56 e 85), Zn (0, 250, 380 e 510) e Al (0, 1000, 1800 e 3600).

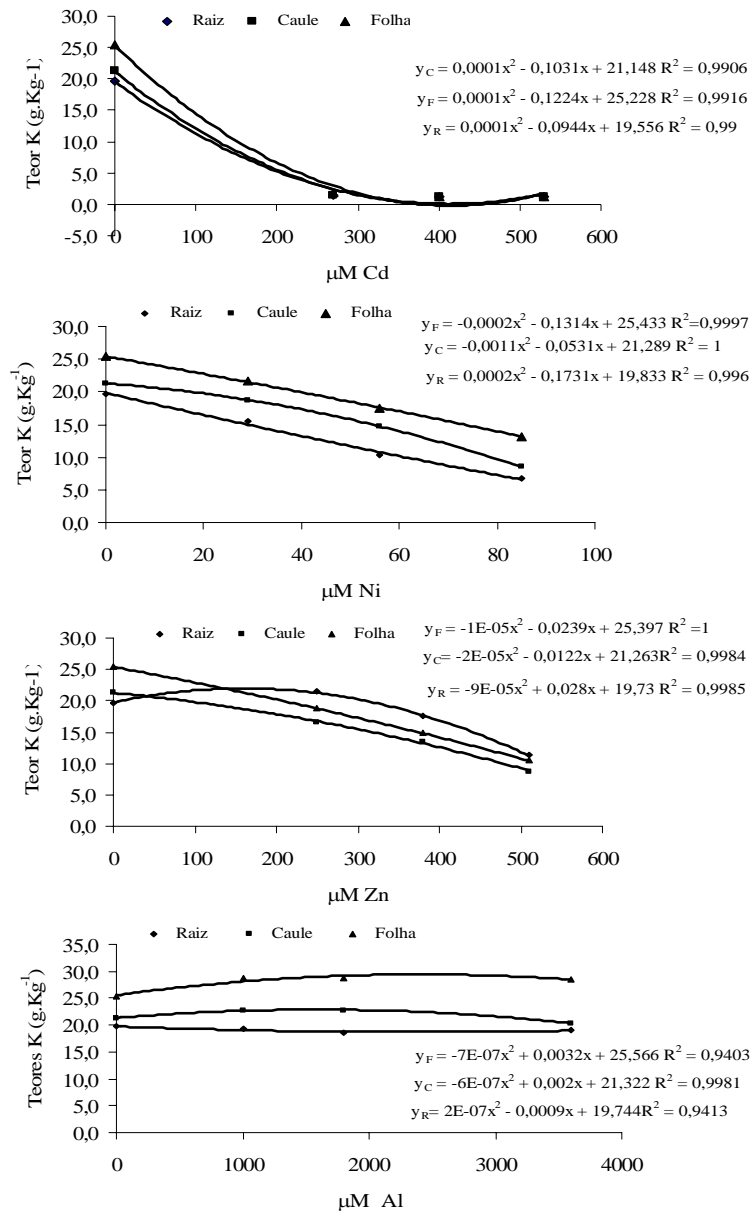


FIGURA 19 Teor de K na matéria seca de raiz, caule e folha de seringueira submetidas a diferentes concentrações em μM de Cd (0, 270, 400 e 530), Ni (0, 29, 56 e 85), Zn (0, 250, 380 e 510) e Al (0, 1000, 1800 e 3600).

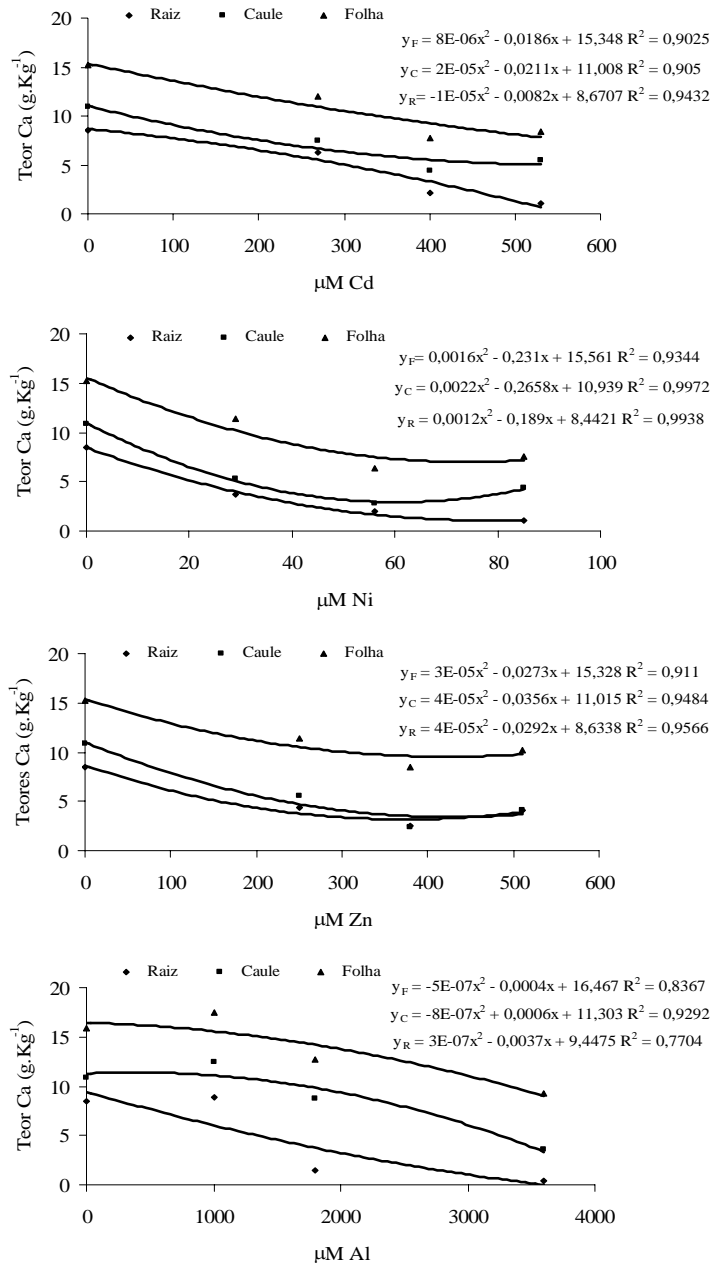


FIGURA 20 Teor de Ca na matéria seca de raiz, caule e folha de seringueira submetida a diferentes concentrações em μM de Cd (0, 270, 400 e 530), Ni (0, 29, 56 e 85), Zn (0, 250, 380 e 510) e Al (0, 1000, 1800 e 3600).

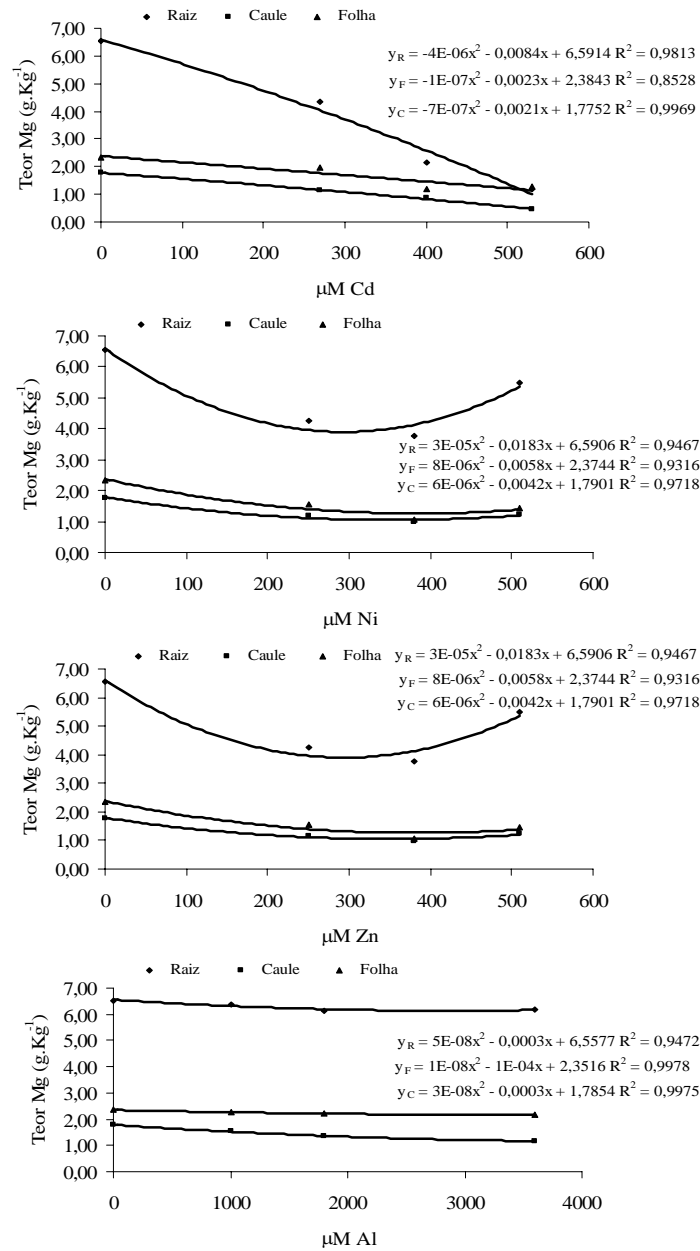


FIGURA 21 Teor de Mg na matéria seca de raiz, caule e folha de seringueira submetida a diferentes concentrações em μM de Cd (0, 270, 400 e 530), Ni (0, 29, 56 e 85), Zn (0, 250, 380 e 510) e Al (0, 1000, 1800 e 3600).

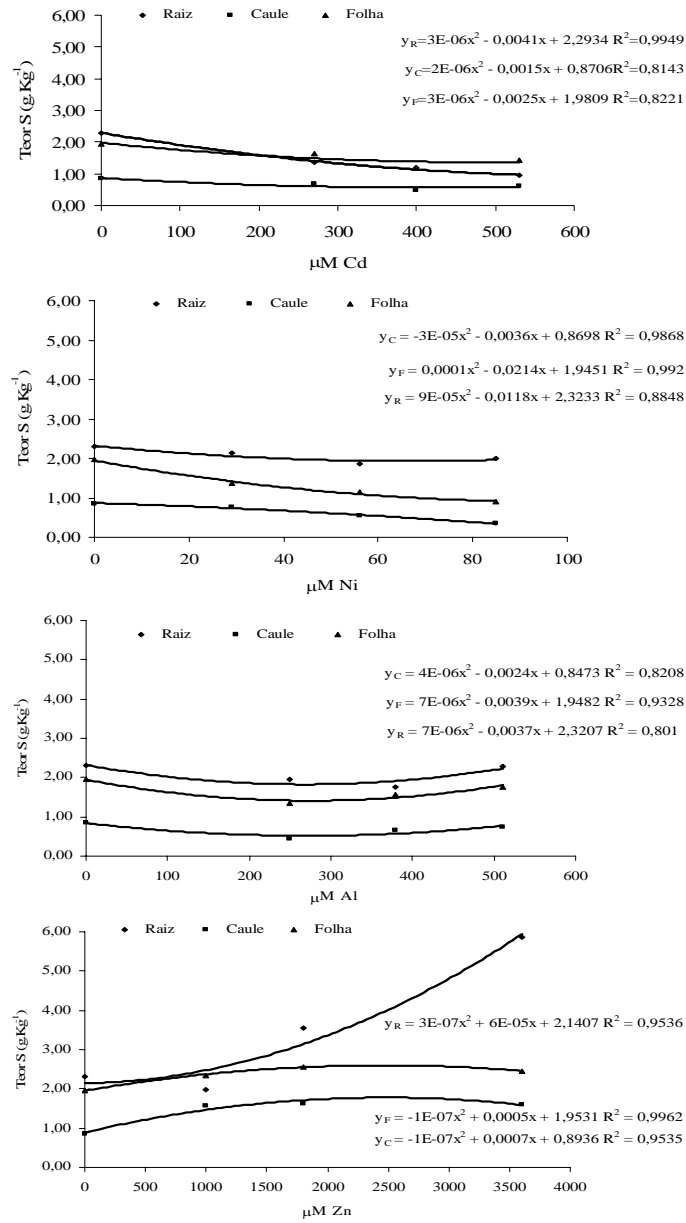


FIGURA 22 Teor de S na matéria seca de raiz, caule e folha de seringueira submetida a diferentes concentrações em μM de Cd (0, 270, 400 e 530), Ni (0, 29, 56 e 85), Al (0, 1000, 1800 e 3600) e Zn (0, 250, 380 e 510).

4.6 Atividade da redutase do nitrato (RN)

Na Figura 23 está representada a atividade da enzima redutase de nitrato em raízes de plântulas de seringueira submetidas a diferentes doses de Cd, avaliadas em três períodos. Observa-se que houve diferença significativa entre as concentrações aplicadas. A liberação de nitrito pelos tecidos foliares apresentou-se baixa em todo o período experimental de exposição ao metal. Delú-Filho et al. (1998) verificaram, em mudas de seringueira, aumento da atividade da enzima até 180 minutos de tempo de reação. No entanto, estudos mostram que não se deve prolongar, por mais de uma hora, o período de incubação, devido às alterações causadas no citoplasma por condições de anaerobiose.

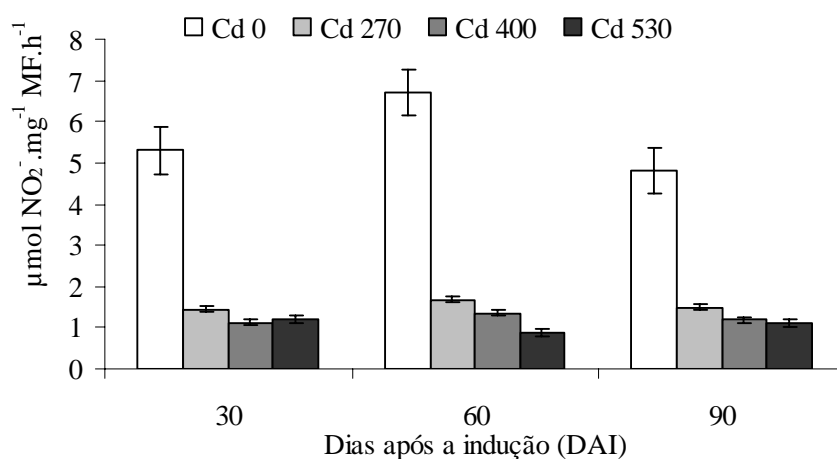


FIGURA 23 Atividade da redutase do nitrato em raízes de plantas de seringueira cultivadas em solução nutritiva, sob diferentes concentrações em μM de Cd (0, 270, 400, 530) (As barras em cada coluna indicam o erro padrão da média de quatro repetições).

Foram observadas, com relação ao Ni e Zn, diferenças significativas entre as concentrações aplicadas, em que se verificou redução na atividade, proporcional ao aumento das concentrações (Figura 24). Este comportamento pode explicar a elevada redução de matéria seca de raiz, provocada pelas concentrações de Ni. Segundo King et al. (1992), a RN sofre uma regulação pelo próprio nitrito, levando a uma redução na sua atividade. Segundo Panda & Choudhury (2005), os metais Cr, Cu e Zn têm efeito inibitório sobre a atividade da RN, quando aplicados em concentrações elevadas, pois afetam a assimilação do amônio.

Com relação ao Al, observou-se redução na atividade da RN independente da concentração aplicada (Figura 25). Segundo Pimenta et al. (1989), trabalhando com sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), o processo de assimilação de amônio parece não apresentar grande sensibilidade ao Al, sendo afetado, principalmente, por meio de efeitos indiretos, sugerindo que a relação existente entre o metabolismo do nitrogênio e o comportamento diferencial das plantas quanto à tolerância ao Al, seja controlado, principalmente, pelos processos de absorção e redução do nitrato.

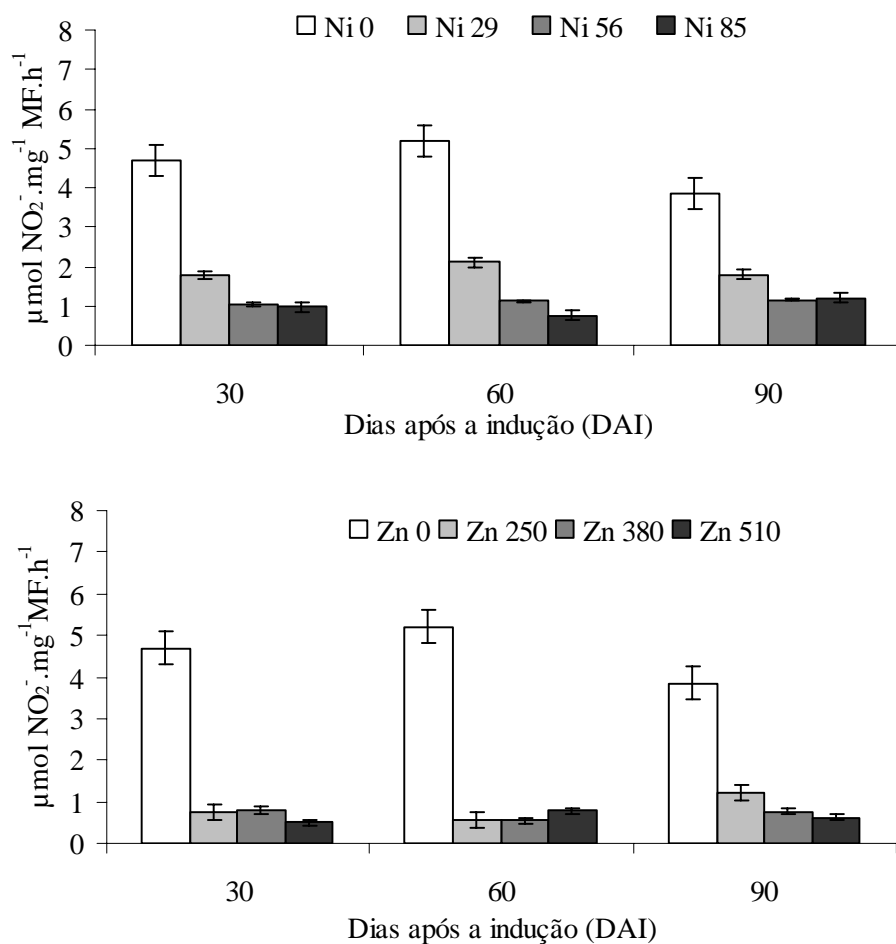


FIGURA 24 Atividade da redutase do nitrato em raízes de plantas de seringueira cultivadas em solução nutritiva, sob diferentes concentrações em μM de Ni (0, 29, 56, 85) e Zn (0, 250, 380, 510) (As barras em cada coluna indicam o erro padrão da média de quatro repetições).

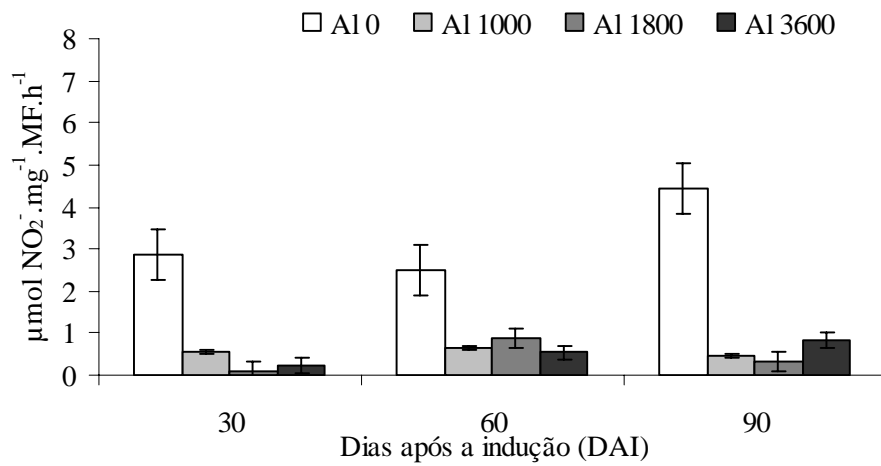


FIGURA 25 Atividade da redutase do nitrato em raízes de plantas de seringueira cultivadas em solução nutritiva, sob diferentes concentrações em μM de Al (0, 1000, 1800, 3600) (As barras em cada coluna indicam o erro padrão da média de quatro repetições).

5 CONCLUSÕES

1. As plantas de seringueira mostraram-se sensíveis às concentrações crescentes de Cd, Ni, Zn e Al em solução nutritiva, exibindo sintomas de fitotoxidez manifestados, principalmente, como murchamento, clorose e necrose dos tecidos e inibição do crescimento da raiz e da parte aérea.
2. Verificou-se redução na produção de matéria seca em todos os órgãos da planta de seringueira, quando submetidas às concentrações de Cd, Ni, Zn e Al.
3. As avaliações de trocas gasosas mostraram queda na taxa de fotossíntese para todos os metais; a resistência estomática foi reduzida com exceção do tratamento com Cd e a taxa de transpiração elevou-se na presença de todos os metais, com exceção do Zn.
4. Os teores dos metais na raiz, no caule e na folha aumentaram com o incremento das doses de metais, sendo mais acentuado nas raízes.
5. A aplicação de concentrações crescentes dos metais pesados Cd, Ni, Zn e Al exerceu efeitos significativos nos teores dos macronutrientes N, P, K, Ca, Mg e S.
6. Houve decréscimo no último mês de avaliação em todas as concentrações. No caso do Cd, foi observada maior eficiência quando houve aumento da concentração. Para os outros tratamentos, não houve diferença significativa.
7. A RN teve sua atividade reduzida nas raízes quando na presença de Cd, Ni e Zn, porém, não houve diferenças entre as concentrações aplicadas, de cada metal, com exceção do Ni.
8. Verificou-se redução acentuada na atividade da RN na presença do Al.

9. Verificou-se redução no número de estômatos nas folhas de seringueira, na presença de Cd, Ni, Zn e Al.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADRIANO, D.C. **Trace elements in the terrestrial environment**. New York: Springer-Verlag, 1986. 533p.

AGARWALA, S.C.; BISCHT, S.S.; SHARMA, C.P. Relative effect aliveness os certain heavy metals in producing toxicity and symptoms of deficiency in barley. **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v.55, n.10, p.1299-1307, May 1977.

ALLOWAY, B.J. Cadmium. In: ALLOWAY, B.J. (Ed.). **Heavy metals in soils**. New York: J. Willey, 1990. p. 100-121.

AMARAL SOBRINO, N.M.B.; COSTA, L.M.; OLIVEIRA, C.; VELLOSO, A.C.X. Heavy metals in fertilizers and liming materials in the State of Minas Gerais. In: ANNUAL CONFERENCE ON TRACE SUBSTANCES IN ENVIRONMENTAL HEALTH, 25., 1991. **Proceedings...** [S.l.:s.n.]: 1992. p. 95-103.

ARDUINI, I.; GODBOLD, D.L.; ONNIS, A. Cadmium and copper uptakes and distribution inMediteeanean tree seedlings. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.97, n.1, p.111-117, May 1996.

ASADA, K. Production and action of active oxygen species in photosynthetic tissue. In: FOYER, C.H.; MULLMEAUX P.M. (Ed.). **Causes of photooxidative stress and aelioration of defense system in plants**. Boca Raton: CRC, 1994. p.77-107.

BAEYENS, J. **Nutricion de las plantas de cultivo**. Madrid: Lemos, 1970. 631p.

BAKER, A.J.M. Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals. **Journal of Plant Nutrition**, v.3, p.643-654, 1981.

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

BAKER, N.R.; WEBBER, A.N.; BRADBURY, M.; MARKWELL, J.P.;
BAKER, M.G.; THORNER, J.P. Development of photochemical competence
during growth of the wheat leaf. In: THORNER, J. P.; STAEHLIN, L. A.;
HALLICK, R. B. (Ed.). **Biosynthesis of the photosynthetic apparatus:**
molecular biology, development and regulation. New York: A. R. Liss, 1984.
p.237-255.

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

BENGTSSON, B.; ASP, H.; BERGGREN, D. Influence of aluminium on
phosphate and calcium uptake in beech (*Fagus sylvatica*) grown in nutrient
solution and soil solution. **Physiologia Plantarum**, v.74, p.299-305, 1988.

BERLYN, G.P.; MIKSCHE, J.P. **Botanical microtechnique and
cytochemistry**. Ames: Iowa State University, 1976. 326p.

BHATTACHARJEE, S.; MUKHERJEE, A.K. Influence of cadmium and lead on
physiological and biochemical response of *Vigna uguiculata* (L). Walp
Seedlings. I. Germination behaviour, total protein, proline and protease activity.
Pollut. Res., v.13, p.269-277, 1994.

BJÖRKMANN, O.; DEMMIG, B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll
fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins.
Planta, New York, v.170, n.2, p. 489-504, June 1987.

BOAWN, L.C.; RARMUSSER, P.E. Crop response to excessive zinc
fertilization of alkaline soil. **Agronomy Journal**, Madison, v.63, n.6, p. 874-
876, Nov./Dec. 1971.

BOLHÀR-NORDENKAMPF, H.R.; LONG, S.P.; BAKER, N.R.; ÖQUIST, G.;
SCHREIDER, U.; LECHNER E.G. Chlorophyll fluorescence as a probe of the
photosynthetic competence of leaves in the field: a review of current
instrumentation. **Functional Ecology**, New York, v.3, p.497-514, 1989.

BOLLE-JONES, E.W. Cooper, its effect on the growth of the rubber plant
(*Hevea brasiliensis*). **Plant and Soil**, Dordrecht, v.10, n.2, p.168-178, 1957.

BOON, D.Y.; SOLTANPOUR, P. N. Lead, cadmium, and zinc contamination
of aspen garden soils and vegetation. **Journal of Environmental Quality**,
Madison, v.21, n.1, p.82-86, Jan./Mar. 1992.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia. **Normas Climatológicas: 1961-1990**. Brasília, 1992. 84p.

BRECKLE, S.W.; KAHLE, H. Effect of Pb and Cd on root growth of young beech trees. In: SYMPOSIUM OF ROOT ECOLOGY AND ITS PRACTICAL APPLICATION, 3., 1992. **Proceedings...** Klagenfurt, 1992. v.1, p.241-244.

BROWN, P.H.; WELCH, R.M.; CARY, E.E.; CHECKAL, R.T. Beneficial effect of nickel on plant growth. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.10, n.9-16, p.2125-2135, June/Dec. 1987.

BUENO, N. **Quantidade de alumínio no substrato afetando o desenvolvimento, a sintomatologia de toxicidade, a concentração e o acúmulo de macro e micronutrientes em seringueira (Hevea ssp)**. Piracicaba: Embrapa, 1987. 92p

BUKATSCH, F. Bemerkungen zur Doppelfärbung Astrablau-safranin. **Microkosmos**, v.61, p.255. 1972.

CAKMAK, I.; BRAUN, H.J. Genotypic variation for zinc efficiency. In: REYNOLDS, M.P.; ORTIZ-MONASTERIO, J.L.; McNAB, A. (Ed.). **Application of physiology in wheat breeding**. México, DF: CIMMYT, 2001. p.183-199.

CAKMAK, I.; MARSCHNER, H. Effect of zinc nutritional status on superoxide radical and hydrogen peroxide scavenging enzymes in bean leaves. In: BARROW, N.J. (Ed.). **Plant nutrition from genetic engineering to field practice**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p.133-137.

CARELLI, M.L.C. et al. Atividade da redutase de nitrato em folhas e raízes de plantas de café (*Coffea arabica* L.). **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v.13, p.119-123, 1990.

CHANEY, R.L. Zinc phytotoxicity. In: ROBSON, A.D. (Ed.). **Zinc in soil and plants**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p.135-150.

CROOKE, W.M. Effect of soil reaction on uptake of nickel from a serpentine soil. **Soil Science**, Baltimore, v.81, n.4, p.269-276, Apr. 1956.

CROOKE, W.M. Effect of heavy metal toxicity on the cation exchange capacity on plant roots. **Soil Science**, Baltimore, v.86, n.5, p.231-241, Nov. 1956.

CUTLER, J.M.; RAINS, D.W. Characterist of cadmium uptake by plan tissue. **Plant Physiology**, Rockville, v.54, n.1, p.67-71, July 1974.

DELHAIZE, E.; RYAN, P.R. Aluminium toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, v.107, p.315-321, 1995.

DELÚ-FILHO, N.; OLIVEIRA, L.E.M.; ALVES, J.D. Atividade da redutase do nitrato em plantas jovens de seringueira (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) otomização das condições de ensaio e ritmo circadiano. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.21, n.3, p.185-190, Dez. 1998.

DEMMIG, B.; BJÖRKMAN, O. Comparison of the effect of excessive light on chlorophyll fluorescence (77K) and photon yield of O₂ evolution in leaves of higher plants. **Planta**, Berlin, v.171, p. 171-184, 1987.

DIXON, N.E.; GAZZOLA, C.; BLAKELEY, R.L.; ZERNER, R. Jack bean urease. A metalloenzyme. A simple biological role for nickel. **Journal of the American Chemical Society**, Washington, v.97, n.14, p.4131-4133, 1975.

FOY, C.D. Differential aluminum and manganese tolerances of plant species and varieties in acid soils. **Ciência e Cultura**, v.28, p.150-155, 1976.

FOY, C.D.; FLEMING, A.L.; GERLOFF, G.C. Differential aluminium tolerance in two snapbean varieties. **Agronomy Journal**, v.64, p.815-818, 1972.

GIGON, A.; RORISON, I.H. The response of some ecologically distinct plant species to nitrate and to ammonium nitrogen. **Journal of Ecology**, v. 60, n.1, p.93-102, 1972.

GILLE, G.; SINGLER, K. Oxidative stress and living cells. **Folia Microbiology**, v.40, p.131-152 1995.

GUO, E.; MARSCHNER, H. Uptake and distribution, and binding of cadmium and nickel in different plant species. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.18, n.12, p.2691-2706, Dec. 1995.

GUSSARSSON, M.; ADALSTEINSSON, S.; JENSEN, P.; ASP, H. Cadmium and copper interactions on the accumulation and distribution of Cd and Cu in

birch (*Betula pendula* Roth.) seedling. **Plant and Soil**, London, v.171, n.1, p.185-187, Apr. 1995.

HARDIMAN, R.T.; JACOBY, B. Absorption and translocation of Cd in bush beans (*Phaseolus vulgaris*). **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.61, n.4, p.670-674, Aug. 1984.

HUANG, G.C.; BAZZAZ, F.A.; VANDERHOEF, L.N. The inhibition of soybean metabolism by cadmium and lead. **Plant Physiology**, Rockville, v.54, n.1, p.122-124, July 1974.

JAIN, M.; GARDE, R.P. Inhibition of nitrate reductase activity by lead in green bean leaf segments: a mechanistic approach. **Journal Plant Physiology**, v.2, p.5-9, 1997

JARVIS, S.C.; HATCH, D.J. Differential effects of low concentrations of aluminium on the growth of four genotypes of white clover. **Plant and Soil**, London, v.99, p.241-253, 1987.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC, 1984. 315p.

KAHLE, H. Response of roots of trees to heavy metals. **Environmental and Experimental Botany**, Great Britain, v.33, n.1, p.99-119, 1993.

KING, B.; SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A. Studies of the uptake of nitrate in barley. Estimation of root cytoplasmic nitrate concentration using nitrate reductase activity: implications of nitrate influx. **Plant Physiology**, v.99, p.1582-1589, 1992.

KLIMASHEYSKII, E.L.; DEDOV, V.M. Localization of the mechanism of growth-inhibiting action of Al^{+3} in elongating cell walls. **Soviet Plant Physiology**, Washington, v.22, p.1040-1046, 1976.

KLUCAS, R.V.; HANUS, F.J.; RUSSELL, S.A.; EVANS, H.J. Nickel, a micronutrient for hydrogen dependent growth of *Rhizobium japonicum* and for expression of urease activity in soybean leaves. **Proceedings of the National Academy of Sciences of USA**, Washington, v.80, p.2253-2257, 1983.

KOTZE, W.A.G.; SHEAR, C.B.; FAUST, M. Effect of nitrogen source and aluminium in nutrient solution on the growth and mineral nutrition of apple and

peach seedlings. **Journal of America Society Horticulture Science**, Mount, v.102, n.3, p.279-282, May 1977.

LABOURIAU, L.G.; OLIVEIRA, J.C.; SALGADO-LABOURIAU, M.L. Transpiração de *Schizolobium puruhiba* (Vell.) Toledo: Comportamento na estação chuvosa, nas condições de Caeté, Minas Gerais, Brasil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v.33, n.2, p.237-257, 1961.

LAGERWERFF, J.V. Lead, mercury, and cadmium as environmental contaminants. In: MORVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M.; LINDSAY, W.L. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p.593-636.

LAGRIFFOUL, A.; MOCQUOT, B.; MENCH, M.; VANGRONSVELD, J. Cadmium toxicity effect als on growth, mineral and chlorophyll contents and actities of stress related enzymes in young maize plants (*Zea mays* L.). **Plant and Soil**, London, v.200, n.2, p.241-250, Mar. 1998.

LABOURIAU, L.G.; OLIVEIRA, J.G.; SALGADO-LABOURIAU, M.L. Transpiração de *Schizolobium parahyba* (Vell) Toledo I. Comportamento na estação chuvosa, nas condições de Caeté, Minas gerais. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v.23, n.2, p.237-257, jun. 1961.

LAGRIFFOUL, A.; MOCQUOT, B.; MENCH, M.; VANGRONSVELD, J. Cadmium toxicity effet als on growth, mineral and chlorophyll contents and actities of stress related enzymes in young maize plants (*Zea mays* L.). **Plant and Soil**, London, v.200, n.2, p.241-250, Mar. 1998

LANGENBACH, T.; SERPA, M. Teor de cádmio nos fertilizantes fosfatados brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.9, n.3, p.179-181, set./dez. 1985.

LIMA, D.U. **Avaliação sazonal da produção e do metabolismo do carbono e nitrogênio em plantas de seringueira (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) cultivadas em Lavras, minas Gerais**. 1998. 71p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

LINDBERG, S. Aluminium interactions with K⁺ (86Rb⁺) and 45Ca⁺² fluxes in three cultivars of sugar beet (*Beta vulgaris*). **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.79, p.275-282, 1990.

LUNA, C.M.; CASANO, L.M. TRIPPI, V.S. Nitrate reductase is inhibition in leaves of *Triticum aestivum* treated with high level of copper. **Physiologia Plantarum**, v.101, p.103-108, 2000.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plants**. São Paulo: Ceres, 1980. 251p.

MARQUES, T.C.L.L.S.M. **Crescimento e absorção mineral de mudas de espécies arbóreas em material de solo contaminado com metais pesados**. 1996. 116p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

MARQUES, T.C.L.L. de S.e M.; MOREIRA, F.M. de S.; SIQUEIRA, J.O. Crescimento e teor de metais de mudas de espécies arbóreas cultivadas em solo contaminado com metais pesados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.1, p.121-132, jan. 2000.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2.ed. San Diego: Academic, 1995. 902p.

MATHYS, W. , Enzymes of heavy metals and non-resistant de and their interaction with some heavy metals in vitro and in vivo. **Plant Physiology**, v.33, p.161-165, 1975.

McCORMICK, L.H., BORDEN, F.Y. Phosphat fixation by aluminium in plant roots. **Soil Science American Proceedings**, v.36, p.799-802, 1972.

MEDRI, E.M.; LLERAS, E. Aspectos da anatomia ecológica de folhas de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. **Acta Amazônica**, Manaus, v.10, n.3, p.463-493, set. 1980.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 3.ed. Worblanfen-Bern: International Potsh Institute, 1982. 655p.

MEGURO, N. R.; MAGALHÃES, A.C. Atividade da reductase do nitrato em cultivares de café. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.17, p.249-257, 1982.

MIGUEL, A.A. **Comportamento fotossintético caracterização morfo-anatômica de folhas de clones de seringueira (*Hevea* spp) em Lavras-MG**. 2005. 182 f. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

- MISHRA, D.; KAR, M. Nickel in plant growth and metabolism. **The Botanical Review**, New York, v.40, n.4, p.395-449, Oct./Dec. 1974.
- MULLA, D.J.; PAGE, A.L.; GANJE, J.J. Cadmium accumulations and bioavailability in soils from long-term phosphorus fertilization. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.9, n.4, p.408-412, Oct./Dec. 1980.
- NAIDOO, G.; STEWART, M.C.D.; LEWIS, R.J. Accumulation sites of Al in snapbean and cotton roots. **Agronomy Journal**, Madison, v.70, n.3, p.489-492, May/June 1978.
- NASCIMENTO, C.W.A., FONTES, L.R.F., NEVES, J.C.L. Mineral composition of two Brazilian corn cultivars as a function of cadmium in the nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.21, n.11, p.2369-2379, Nov. 1998.
- NIEVOLA, C.C.; MERCIER, H. Variações diurnas da atividade in vivo da redutase do nitrato em abacaxizeiro (*Ananas comusus* (L.) Merr.- Bromeliaceae). **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v.24, p.295-301, 2001.
- OLIVEIRA, L.E.M. **Crescimento e comportamento nutricional de cultivares de mandioca (*Manihot esculenta* Grantz) submetidos a níveis de alumínio.** 1979. 39p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- OLIVEIRA, J.A.; OLIVA, M.A.; CAMBRAIA, J. Effect of cadmium on chlorophyll contents and on peroxidase activity in soybean. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, São Carlos, v.6, n.2, p.97-101, Jul./Dec. 1994.
- OLIVEIRA, L.E.M.; RENA, A.B. Influência do alumínio sobre o comportamento nutricional de cultivares de mandioca em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.24, n.9, p.1119-1130, 1989.
- OLIVEIRA, M.A.J.; PEREIRA-NETTO, A.B. Aspectos ecológicos da redutase de nitrato em *Aspidosperma polyneuron* e *Croton urucurana*. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v.5, p.79, 1993.
- OLIVEIRA, M.A.J.M. et al. Padronização das condições de ensaio “in vivo” da redutase de nitrato (EC 1.6.1) em aveia preta (*Avena strigosa* Shreb). **Científica**, Barra Mansa, v.24, p.215-224, 1996.

OLSEN, S.R. Micronutrients interactions. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M.; LINDSAY, W.L. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p.243-264.

PAIVA, H. N. de. **Toxidez de Cd, Ni, Pb e Zn em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.)**. 2000. 283p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

PAIVA, H.N.; DE CARVALHO, J.G.; SIQUEIRA, J.O. Efeito da aplicação de cádmio sobre o teor de nutrientes em mudas de Cedro (*Cedrela fissilis* VELL.). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.11, n.2, p.153-162, 2001.

PALÁCIOS, G.; GÓMEZ, I.; CARBONELL-BARRACHINA, A.; NAVARRO PEDREÑO, J. MTAIX, J. Effect of nickel concentration on tomato plant nutrition and dry matter yield. **Journal of Plant Nutrition**, v.21, n.10, p.2179-2191, 1998.

PANDA, S.K.; CHOUDHURY, S. Changes in nitrate reductase activity and oxidative stress response in the moss *Polytrichum commune* subjected to chromium, copper and zinc phytotoxicity. **Brazilian Journal Plant Physiology**, v.17, n.2, p.191-197, 2005.

PANDA, S.K.; CHAUDHURY, I.; KHAN, M.H. Heavy metals induce lipid peroxidation and affect antioxidants in wheat leaves. **Biology Plantarum**, v.46, p.289-294, 2003.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. Toxidez de metais em plantas. II. Caracterização da toxidez de níquel em cafeeiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.17, n.2 p.323-328, fev. 1982.

PATSIKKA, E.; KAIRAV, M.; SERSEN, F.; ARO, E.M.; TYYSTJAVI, E. Excess copper predisposes photosystem 2 to photoinhibition in vivo by outcompeting iron and causing decrease in leaf chlorophyll. **Plant Physiology**, v.129, p.129-135, 2002.

PEPPER, J.L.; BEZDICEK, D.F.; BAKER, A.S.; SIMS, J.M. Silage crop uptake of sludge applied zinc and cadmium affected by soil pH. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.6, n.1, p.18-20, Jan./Mar. 1983.

PEREIRA, J. da P. **Seringueira: formação de mudas, manejo e perspectivas no Noroeste do Paraná**. Londrina, IAPAR, 1992. 60p. (Circular, 70).

PIMENTA, J.A.; CAMBRAIA, J.; SANT'ANNA, R.; ESTEVÃO, M.M. Efeito do alumínio sobre enzimas ligadas à assimilação do nitrogênio em sorgo (*Sorghum bicolor* L. Mench). **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.1, n.2, p.169-175, 1989.

POLLARD, A.J.; BAKER, A.J.M. Deterrence of herbivory by zinc hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens* (Brassicaceae). **New Phytologist**, London, v.135, p.655-658, 1997.

POTSCH, C. **Mineralogia**. Rio de Janeiro: Livraria São José, 1967. 337p.

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

PRASAD, K.V.S.K; PANDHA, S.P.; SHARMILA, P. Concerted action of antioxidante enzymes and curtailed growth under zinc toxicity in Brassica juncea. **Environment Exp. Botany**, v.42, p.1-10, 1999.

QUARTACCI, M.F.; COSI, E.; NAVARI-IZZO, F. Lipids and NADPH dependent superoxide in plasma membrane vesicle from roots of wheat grown under copper deficiency or excess. **Journal Exp. Botany**, v.52; p.77-84, 2001.

QUEIROZ, C.G.S.; RENA, A.B.; CORDEIRO, A.T. et al. Ritmo diurno na atividade da redutase de nitrato em folhas e raízes de Coffea arábica L. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.28, n.7, p.787-795, jul. 1993.

SALTE, D.E.; SMITH, R.D.; RASKIN, I. Phytoremediation. **Annual Rev. Plant Physiology Plant Molecular Biology**, v.49, p.643-668, 1995.

SAMSUDDIN, Z.; IMPENS, I. The development of photosynthetic rates with leaf age in Hevea brasiliensis Muell. Arg. Clonal seedlings. **Photosynthetica**, Prague, v.13, n.3, p.267-270, 1978a.

SAMSUDDIN, Z.; IMPENS, I. Photosynthetic rates and diffusion resistances of seven Hevea brasiliensis Muell. Arg. Clones. **Biologia Plantarum**, Compenhgen, v.21, n.2, p.154-156, 1978b.

SANTOS, I.C.F. **Cinética de indução da fluorescência da clorofila em dois genótipos de Theobroma cacao infectados com Crinipellis pernicioso**. 1996. 85p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal da Bahia, Salvador.

SENDEN, M.H.M.N.; VAN DER MEER, A.J.G.M.; VERBURG, T.G.; WOLTERBEEK, H.T. Citric acid in tomato plant roots and its effect on cadmium uptake and distribution. **Plant and Soil**, London, v.171, n.2, p.333-339, Apr. 1995.

SHAW, A.J. **Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects**. New York: CRC, 1989. 355p.

SIFFER, P.; DURCHAN, M.; KUETON, J.; ONDREJ, M.; SESTAK, Z. Photoynthesis in regenerants of tobacco transformed by plasmids of *Agrobacterium*. II. Fluorescence emission spectra and age induced changes in slow fluorescence induction. **Photosynthetica**, Prague, v.22, n.2, p.214-220, 1988.

SMIRNOFF, N.; STEWART, G.R. Nitrate assimilation and translocation higher plants: comparative physiology and ecological consequences. **Physiology Plantarum**, Copenhagen, v.64, p.133-140, 1985.

SMIRNOFF, N.; TODD, P.; STEWART, G. R.. The occurrence of nitrate reduction in the leaves of woody plants. **Annals of Botany**, Oxford, v.54, p.363-374, 1984.

SMITH, G.C.; BRENNAN, E. Response of silver maple seedlings to an acute dose of root applied cadmium. **Forest Science**, Bethesda, v.30, n.3, p.582-586, Sept. 1984.

SOARES, C.R.F.S. **Toxidez de zinco, cobre, cádmio e chumbo para o eucalipto em solução nutritiva**. 1999. 132p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SOARES, C.R.F.S.; GRAZZIOTTI, P.H.; SIQUEIRA, J.O; DE CARVALHO, J.G.; MOREIRA, F.M.S. Toxidez de zinco no crescimento e nutrição de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.2, p.339-348, fev. 2001.

SOUZA, C.A.F. de. **Influência do alumínio na mobilização de reservas, nutrição mineral e crescimento de plântulas de seringueira (*Hevea brasiliensis* Muell Arg.)**. 1991. 120p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

VAN WIJK, K.; KRAUSE, G.H. Oxygen dependence of photoinhibition at low temperature in intact photoplast of *Valerianella locusta* L. **Planta**, New York, n.1, p.135-142, 1991.

VALADARES, J.M.A.S.; GAL, M.; MINGELGRIN, U.; PAGE, A.L. Some heavy metals in soils treated with sewage sludge, their effects on yield, and their uptake by plants. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.12, n.1, p.49-57, Jan./Mar. 1983.

VALLE, B.L.; FALCHUK, K.H. The biochemical basis of zinc physiology. **Physiology Reviews**, v.73, p.79-118, 1993.

VERKLEIJ, J.A.C.; PRAST, J.E. Cadmium tolerance and co-tolerance in *Sila vulgaris* (Moench.) Garcke [= *S. cucubalus* (L.) Wib.]. **The New Phytologist**, New York, v.111, n.4, p.637-645, Apr. 1989.

WALKER, C.D.; GRAHAM, R.D.; MADISON, J.T.; CARY, E.E.; WELCH, R.M. Effects of nickel deficiency on some nitrogen metabolites in cowpeas (*Vigna unguiculata* L. Walp.). **Plant Physiology**, Bethesda, v.79, n.2, p.474-479, Oct. 1985.

YANG, X.; BALIGAR, V.C.; MARTENS, D.C.; CLARK, R.B. Plant tolerance to nickel toxicity: II Nickel effects on influx and transport of mineral nutrients in four plant species. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.2, n.19, p.265-279, 1996.