



ALEXANDRE CARVALHO BERTOLI

**EFEITOS DO CÁDMIO E DO CHUMBO NO
CRESCIMENTO, TRANSLOCAÇÃO E TEOR DE
NUTRIENTES TOMATEIRO (*Lycopersicum
esculentum*) CULTIVADO EM SOLUÇÃO
NUTRITIVA**

LAVRAS - MG

2011

ALEXANDRE CARVALHO BERTOLI

**EFEITOS DO CÁDMIO E DO CHUMBO NO CRESCIMENTO,
TRANSLOCAÇÃO E TEOR DE NUTRIENTES TOMATEIRO
(*Lycopersicon esculentum*) CULTIVADO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, área de concentração Agroquímica, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Ruy Carvalho

LAVRAS – MG

2011

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

Bertoli, Alexandre Carvalho.

Efeitos do cádmio e do chumbo no crescimento,
translocação e teor de nutrientes tomateiro (*Lycopersicum
esculentum*) cultivado em solução nutritiva / Alexandre
Carvalho Bertoli.– Lavras : UFLA, 2011.

95 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Ruy Carvalho.

Bibliografia.

1. Química ambiental. 2. Metais pesados. 3. Tomate. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 635.6428911

ALEXANDRE CARVALHO BERTOLI

**EFEITOS DO CÁDMIO E DO CHUMBO NO CRESCIMENTO,
TRANSLOCAÇÃO E TEOR DE NUTRIENTES TOMATEIRO
(*Lycopersicon esculentum*) CULTIVADO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, área de concentração Agroquímica, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 18 de fevereiro de 2011.

Dra. Ana Rosa Ribeiro Bastos UFLA

Dr. Walclée de Carvalho Melo UFLA

Dr. Ruy Carvalho
Orientador

LAVRAS – MG

2011

*Aos meus pais, **José e Beatriz**, por terem sempre acreditado e confiado em mim.*

Amo vocês.

*A minha irmã, **Juliana**, pelo incentivo e força nos momentos difíceis. Amo você.*

*À minha noiva, **Sara**, pelo carinho, força, apoio, dedicação e amizade. Amo você.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus e à Nossa Senhora, por terem iluminado e guiado o meu caminho até a vitória deste dia.

Ao meu orientador, professor Ruy Carvalho, ao qual agradeço pela confiança, pelos ensinamentos e, principalmente, pela amizade. MUITO OBRIGADO!

As minhas amigas Marcelle e Amanda, pela ajuda na parte experimental do trabalho, especialmente Marcelle que sempre me “socorreu” nas horas difíceis, com atenção e paciência.

Aos amigos do curso de Agroquímica, pela amizade e ajuda nos momentos difíceis. Aos funcionários do Departamento de Química; aos amigos do Laboratório de Análise Foliar, Wilsinho, Marcelo, Marli, Lidiane, Cleusa, Chulita, pela amizade e ajuda. E a todos que, durante estes anos, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste sonho, MUITO OBRIGADO!

Aos meus amigos e companheiros de república, Samir e Rafael, pela amizade durante todos estes anos de convivência, sempre me apoiando e incentivando. Aos meus amigos que, mesmo de longe, sei que nunca deixaram de torcer por mim, especialmente ao Rodrigo, pelas conversas, apoio, incentivo e amizade nas horas difíceis.

A minha prima Heloísa, pelo incentivo, apoio e pela mão amiga na hora mais difícil. A toda a minha família que, em todos os momentos, torceu por mim.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Química, pela oportunidade e à Capes, pela concessão da bolsa.

Ao Departamento de Ciência dos Alimentos, especialmente ao Renato, pela liofilização das amostras.

Ao Departamento de Ciência do Solo, especialmente à professora Dra. Janice Guedes de Carvalho, pelo espaço e auxílio na condução do experimento e à pesquisadora Ana Rosa Ribeiro Bastos, pela atenção, apoio e amizade. E a todos que, durante estes anos, contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste sonho, MUITO OBRIGADO!

RESUMO

Visando avaliar o efeito da aplicação de doses de cádmio e chumbo na cultura do tomate e a influência desses metais sobre o teor, o crescimento e o índice de translocação de macronutrientes (P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Cu, Mn, Zn e Fe) em diferentes partes das plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum*) foi montado um ensaio em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras. As plantas foram cultivadas em solução nutritiva de Clark e submetidas a doses Cd: 0; 0,025; 0,1; 0,5 e 1,0 mg L⁻¹ e Pb 0; 0,25; 1,0; 5,0 e 10 mg L⁻¹. O cádmio translocou-se 21,9% a mais que o chumbo para a parte aérea, indicando que o Pb concentrou-se nas raízes, enquanto nos frutos a translocação desses metais chegou a 1,89% para o Cd e 1,38% para o Pb. Em relação ao tratamento controle, a produção de frutos foi reduzida a partir da concentração 5,0 mg L⁻¹ de Pb e 1,0 mg L⁻¹ de Cd. As doses de Pb utilizadas reduziram o teor de K na parte aérea, S nas raízes e Zn nos frutos, enquanto o Cd reduziu os teores de K, Ca, Mn e Zn na parte aérea, K nos frutos e Mn nas raízes. A aplicação de Cd reduziu a translocação P e Cu na parte aérea e não influenciou a translocação de K, Ca, Mg e Zn. O Pb reduziu a translocação de P nos frutos e parte aérea, não influenciou a translocação de Zn e Fe, Ca e Cu nos frutos e de K e Mg na parte aérea.

Palavras-chave: Química Ambiental. Metais pesados. Tomate.

ABSTRACT

Having the objective of evaluating the effect of application of rising doses of cadmium and lead in the culture of tomato and the influence of these metals in the content, growth and translocation index of macronutrients (P, K, Ca, Mg and S) and micronutrients (Cu, Mn, Zn and Fe) in different parts of the tomato plants (*Lycopersicon esculentum*) an assay was carried out in the greenhouse of the Department of Soil Science at the Federal University of Lavras. The plants were cultivated in nutritive solution of Clark and submitted to rising doses of Cd: 0; 0,025; 0,1; 0,5 and 1,0 mg L⁻¹ and Pb 0; 0,25; 1,0; 5,0 and 10 mg L⁻¹. Cadmium translocated 21,9% to more than lead to the aerial part showing Pb concentrated in the roots while in the fruits, the translocation of these metals reached 1,89% for Cd and 1,38% for Pb. In relation to the control treatment, the fruits production was reduced from the concentration 5,0 mg L⁻¹ de Pb and 1,0 mg L⁻¹ of Cd. The used Pb doses reduced the content of K in the aerial part, S in the roots and Zn in the fruits while Cd reduced the contents of K, Ca, Mn and Zn in the aerial part, K in the fruits and Mn in the roots. The application of Cd reduced the P and Cu translocation in the aerial part and did not influence in the translocation of K, Ca, Mg and Zn. Pb reduced the translocation of P in the fruits and aerial part, did not influence in the translocation of Zn and Fe, Ca and Cu in the fruits of K and Mg in the aerial part.

Keywords: Environmental Chemistry. Heavy metals. Tomato.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Teores de macronutrientes K (a) e P (b), nos frutos, parte aérea e raízes de plantas de tomate, em função de doses diferentes de cádmio (*significativo a 5% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)	34
Gráfico 2	Teores de macronutrientes Ca (a), Mg (b) e S (c), nos frutos, parte aérea e raízes de plantas de tomate, em função de doses diferentes de cádmio (*e** significativo a 5% e a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F).....	35
Gráfico 3	Teores de micronutrientes Cu (a), Mn (b), Zn (c) e Fe (d), nos frutos, parte aérea e raízes de plantas de tomate, em função de doses diferentes de cádmio (*e** significativo a 5% e a 1% de probabilidade e ns, não significativo pelo teste F).	38
Gráfico 4	Índice de translocação de macronutrientes K (a), P (b), Ca (c) e Mg (d), nos frutos e parte aérea do tomateiro, em função de doses diferentes de cádmio (* significativo a 5% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F).....	41
Gráfico 5	Índice de translocação do macronutriente S (a), nos frutos e parte aérea do tomateiro, em função de doses diferentes de cádmio (* significativo a 5% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)	42
Gráfico 6	Índice de translocação de micronutrientes Cu (a), Mn (b), Zn (c), Fe (d), nos frutos e parte aérea do tomateiro, em função de doses diferentes de cádmio (*e** significativo a 5% e a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)	44
Gráfico 7	Teores de macronutrientes K (a) e P (b), nos frutos, parte aérea e raízes de plantas de tomate, em função de doses diferentes de chumbo (*e** significativo a 5% e a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F).....	46
Gráfico 8	Teores de macronutrientes Ca (a), Mg (b) e S (c) nos frutos, parte aérea e raízes de plantas de tomate, em função de doses diferentes de chumbo (** significativo a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)	47
Gráfico 9	Teores de micronutrientes Cu (a) e Mn (b), nos frutos, parte aérea e raízes de plantas de tomate, em função de doses diferentes de chumbo (** significativo a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)	50
Gráfico 10	Teores de micronutrientes Zn (a) e Fe (b), nos frutos, parte aérea e raízes de plantas de tomate, em função de doses diferentes de	

	chumbo (***) significativo a 5% e a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F).....	51
Gráfico 11	Índice de translocação de macronutrientes K (a) e P (b), nos frutos e parte aérea do tomateiro, em função de doses diferentes de chumbo (** significativo a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)	53
Gráfico 12	Índice de translocação de macronutrientes Ca (a), Mg (b) e S (c), nos frutos e parte aérea do tomateiro, em função de doses diferentes de chumbo (** significativo a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F).....	54
Gráfico 13	Índice de translocação de micronutrientes Cu (a) e Mn (b), nos frutos e parte aérea do tomateiro, em função de doses diferentes de chumbo (** significativo a 1% de probabilidade, ns não significativo pelo teste F)	56
Gráfico 14	Índice de translocação de micronutrientes Zn (a) e Fe (b), nos frutos e parte aérea do tomateiro, em função de doses diferentes de chumbo (ns não significativo pelo teste F).....	57
Gráfico 15	Teor de Cd nas raízes, parte aérea e frutos do tomateiro, em função de doses diferentes de cádmio (** significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F)	59
Gráfico 16	Índice de translocação de Cd na parte aérea e frutos do tomateiro, em função de doses diferentes de cádmio (** significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F).....	60
Gráfico 17	Teor de Pb nas raízes, parte aérea e frutos do tomateiro, em função de doses diferentes de chumbo (** significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F)	62
Gráfico 18	Índice de translocação de Pb na parte aérea e nos frutos do tomateiro, em função de doses diferentes de chumbo (**significativo, a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Solução nutritiva de Clark.....	30
Tabela 2 Parâmetros espectroscópicos utilizados na determinação dos teores dos elementos.....	32
Tabela 3 Média dos valores de matéria seca (MS) das partes da planta em função da aplicação de Cd.....	66
Tabela 4 Média dos valores de matéria seca (MS) das partes da planta em função da aplicação de Pb.....	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Metais pesados (ou elementos traços)	17
2.1.1	Contaminação por metais pesados	18
2.1.2	Chumbo (Pb)	20
2.1.3	Cádmio (Cd)	21
2.2	Influências dos metais pesados na absorção e na translocação de minerais nas plantas	23
2.3	Cultivo em solução nutritiva	25
2.4	Cultivo de tomate	27
3	MATERIAL E MÉTODO	29
3.1	Instalação e condução dos ensaios experimentais	29
3.2	Aplicação dos metais Cd e Pb	31
3.3	Análises espectrofotométricas	31
3.4	Avaliação experimental	32
3.5	Delineamento estatístico	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1.1	Teor de P, K, Ca, Mg e S sob influência de doses diferentes de Cd	34
4.1.2	Teor de Cu, Mn, Zn e Fe sob influência de doses diferentes de Cd	37
4.1.3	Índice de translocação (IT) dos macronutrientes sob influência de doses diferentes de Cd	40
4.1.4	Índice de translocação (IT) dos micronutrientes sob influência de doses diferentes de Cd	43
4.1.5	Teor de P, K, Ca, Mg e S sob influência de doses diferentes de Pb	46
4.1.6	Teor de Cu, Mn, Zn e Fe sob influência de doses diferentes de Pb	50
4.1.7	Índice de translocação (IT) dos macronutrientes sob influência de doses diferentes de Pb	53
4.1.8	Índice de translocação (IT) dos micronutrientes sob influência de doses diferentes de Pb	56
4.2	Teor e translocação de Cd nos diferentes compartimentos do tomateiro	58
4.3	Teor e translocação de Pb nos diferentes compartimentos do tomateiro	61
4.4	Influência das doses de Cd na produção de matéria seca do tomateiro	65
4.5	Influência das doses de Pb na produção de matéria seca do tomateiro	67

5	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS	70
	ANEXOS	77

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas ambientais que afligem a sociedade moderna é a enorme quantidade de efluentes contaminados liberados pelas indústrias e, entre os diversos tipos de poluentes lançados nos ecossistemas, estão os metais pesados (ou elementos traços). Metais como o cádmio (Cd) e chumbo (Pb) não apresentam quaisquer benefícios ao organismo humano e, atualmente, a contaminação dos solos e das águas por estes elementos é um grave problema ambiental, devido à sua persistência e ao elevado poder de toxicidade.

Por definição, metais pesados são elementos químicos que têm peso específico maior que 5 g cm^{-3} , daí advindo a denominação metais pesados. Alguns deles são benéficos em pequenas quantidades para microrganismos, plantas e animais, porém, em concentrações elevadas, tornam-se perigosos, podendo contaminar as plantas, os animais e o homem (COOKER; MATHEUS, 1983). Pelo fato de nem sempre esses materiais apresentarem-se como traços no meio ambiente, neste trabalho optou-se por utilizar ambas as denominações, elementos traços e metais pesados.

A preocupação com o nível de metais pesados advém da capacidade de ficar retido no solo, solubilizarem-se na água, da sua movimentação, da possibilidade de atingirem o lençol freático e, sobretudo, da sua absorção pelas plantas, podendo atingir, assim, a cadeia alimentar (COSTA, 1991). Estes elementos são amplamente distribuídos no meio ambiente, sendo depositados na água (lagos, rios e oceanos), acumulados no solo, nas plantas, nos animais, provenientes da lixiviação do solo e como produto do desenvolvimento da tecnologia moderna (poluição atmosférica e fontes antropogênicas, dentre as quais se destacam a indústria química e metalúrgica, a mineração, alguns pesticidas agrícolas e esgotos domésticos) (COSTA, 1991; KOS; LESTAN, 2003; PAIM et al., 2006).

A possibilidade de contaminação ambiental por metais pesados está diretamente relacionada com os processos de adsorção-dessorção desses elementos nos solos. No solo, os metais pesados podem estar adsorvidos eletrostaticamente nos sítios de troca, na solução do solo e ligados a compostos orgânicos. Fatores como teores e tipos de argila, pH, capacidade de troca de cátions, teor de matéria orgânica, entre outros, influenciam as reações de adsorção/dessorção, precipitação/dissolução, complexação e oxirredução de metais no solo (CARVALHO et al., 2008), influenciando também, dessa forma, a concentração e disponibilidade dos elementos traços para as plantas.

Embora as consequências da contaminação dos solos por metais pesados sejam mais bem entendidas nos dias atuais, esforços têm sido feitos no sentido de desenvolver técnicas de descontaminação fundamentadas em processos naturais, com custo mais baixo. Uma das maneiras de contornar esses problemas de contaminação do solo seria o uso de sistemas hidropônicos de cultivo, em que os nutrientes do solo são fornecidos por meio de uma solução aquosa contendo apenas os elementos químicos essenciais aos vegetais (ALVARENGA, 2004).

Os cultivos em sistemas hidropônicos oferecem um ambiente propício para a disponibilidade de minerais, favorecendo o transporte da solução nutritiva para as culturas, permitindo estudos mais criteriosos de translocação, cinética de absorção e redistribuições de minerais em plantas (BELL; JAMES; CHANEY, 1991; QU et al., 2003), além de permitir evitar a contaminação dos alimentos por substâncias tóxicas, como os metais pesados.

Assim, devido ao avanço da degradação ambiental e à ampla toxicidade dos metais pesados para as plantas, para os animais e para saúde humana e pelo fato de as plantas serem o principal ponto de ligação entre os metais pesados e o homem via cadeia alimentar é que se torna necessária a realização de estudos que possibilitem a determinação do efeito desses elementos nas plantas. Diante disso, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a translocação dos

metais pesados cádmio (Cd) e chumbo (Pb), por meio de análise por espectrofotometria de absorção atômica, na cultura de tomate (*Lycopersicon esculentum*) cultivado em sistema hidropônico. O tomate foi escolhido no intuito de avaliar o comportamento dos metais Cd e Pb em hortaliças produtoras de frutos e o emprego da cultivar Santa Clara foi devido à resistência a doenças e pragas, além de ser uma das variedades de tomates mais cultivadas.

Dentre os objetivos específicos deste trabalho destacam-se:

- a) estudar os efeitos de doses de Cd e Pb na nutrição do tomateiro cultivado em sistema hidropônico;
- b) avaliar a translocação de Cd e de Pb nas plantas de tomate;
- c) indicar e discutir os limites de tolerância do tomate a Cd e Pb, capazes de influenciar a sua produção.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Metais pesados (ou elementos traços)

Os metais pesados diferenciam-se dos compostos orgânicos tóxicos por serem absolutamente não degradáveis, podendo acumular-se no meio ambiente, onde apresentam alta toxicidade (BAIRD, 2002).

Esses elementos são encontrados naturalmente no solo em concentrações que variam de μg a mg kg^{-1} , as quais são inferiores às consideradas tóxicas para diferentes organismos vivos. Alguns desses metais, como o Co, o Cu e o Zn, são elementos essenciais às plantas, entretanto, o emprego de fungicidas, fertilizantes, esterco de animais, lixo urbano, lodo de esgoto no solo e a deposição de poeiras industriais poderá elevar as concentrações destes metais e de outros, como Cd e Pb, até níveis tóxicos (MARSOLA; MIYAZAWA; PAVAN, 2005).

Por definição, metais pesados são elementos químicos que possuem densidade maior que 5 g cm^{-3} (GONÇALVES JÚNIOR; LUCHESE; LENZI, 2000), também conhecidos como elementos-traço, por serem encontrados naturalmente em baixas concentrações na crosta terrestre (normalmente na ordem de parte por milhão – PPM - ou parte por bilhão - ppb) (TAN, 2000). A expressão metal pesado abrange metais, semimetais e até mesmo não metais, como o selênio. Essa expressão é também utilizada para designar os metais classificados como poluentes do ar, água, solo, plantas e alimentos, ou seja, do meio ambiente em geral (FILGUEIRA, 2007).

Dos 92 elementos químicos que ocorrem naturalmente na crosta terrestre, 53 são metais pesados. Entre estes metais, Fe, Mo, Mn, Zn e Cu são importantes como micronutrientes (BENAVIDES; GALLEGO; TOMARO, 2005), enquanto Ag, As, Hg, Cd, Pb e Sb são aqueles que pertencem a um grupo

de elementos que não têm características benéficas e nem essenciais para os organismos vivos, produzindo efeitos danosos para as funções metabólicas normais, mesmo quando presentes em quantidades traços (BENAVIDES; GALLEGO; TOMARO, 2005; PARMIGIANE; MIDIO, 1995) devido ao seu poder de toxicidade e bioacumulação. Isso porque eles podem se concentrar nos solos e ser absorvidos pelas plantas em quantidades suficientes para afetar negativamente o seu desenvolvimento e ou a saúde dos consumidores (BAIRD, 2002).

Os metais pesados acumulam-se frequentemente na camada superficial do solo, (0-20cm), também chamada camada “agricultável”, tornando-se, assim, acessíveis às raízes das plantas e, por consequência, acumuláveis em organismos vivos. Esta é a causa mais frequente de intoxicação e do envenenamento de organismos, como plantas, animais em pastoreio e seres humanos. A mobilidade desses elementos depende, fundamentalmente, das reações químicas de adsorção e dessorção que ocorrem entre eles em solução e os componentes sólidos do sistema. Essas reações são influenciadas por vários fatores, merecendo destaque a presença de ligantes orgânicos e inorgânicos (ALLOWAY, 1990).

2.1.1 Contaminação por metais pesados

A intensa utilização de fertilizantes e pesticidas de forma inadequada, juntamente com o aumento das atividades industriais e de mineração, são as principais fontes causadoras da contaminação dos solos e dos corpos d'água por metais pesados (AGUIAR; NOVAES; GUARINO, 2002; MALAVOLTA, 1994). A preocupação com o nível de contaminação por metais pesados vem, principalmente, da capacidade de retenção destes metais pelo solo, da sua movimentação neste, da possibilidade de atingirem o lençol freático e,

sobretudo, da sua absorção pelas plantas, podendo atingir, assim, a cadeia alimentar (COSTA, 1991).

Segundo Campos et al. (2005), insumos agrícolas ou subprodutos utilizados com finalidade corretiva ou nutricional na agricultura podem ser uma das principais fontes de contaminação por metais pesados. Também segundo este mesmo autor, as adições globais de metais pesados ao solo por fertilizantes são da ordem de 30.000-250.000 kg ano⁻¹ de Cd, 50.000-580.000 kg ano⁻¹ de Cu, 30.000-380.000 kg ano⁻¹ de Cr, 200.000-550.000 kg ano⁻¹ de Ni, 420.000-2.300.000 kg ano⁻¹ de Pb e 260.000-1.100.000 kg ano⁻¹ de Zn.

As altas concentrações de metais pesados iônicos solúveis nos solos podem, por meio de sua movimentação, contaminar as águas subterrâneas (YARON; CALVET; PROST, 1996), além, também, de acumular-se nos tecidos vegetais a partir de sua absorção pelas raízes das plantas cultivadas em solos poluídos. A possibilidade de contaminação ambiental por metais pesados está diretamente relacionada com os processos de adsorção-dessorção desses elementos nos solos. Os metais, ao interagirem com as moléculas presentes nos solos, podem deslocar os átomos de hidrogênio de grupamentos funcionais, resultando, assim, na formação de sais complexos. A complexação destes metais com essas substâncias ocorre, principalmente, por reação com os grupos carboxílicos e/ou fenólicos e alcoólicos (STEVENSON; FITCH, 1986).

No solo, os metais pesados podem estar adsorvidos eletrostaticamente nos sítios de troca, na solução do solo e ligados a compostos orgânicos. Diversas características dos solos, como pH, capacidade de troca catiônica, teor e tipo de matéria orgânica, teor e tipo de argila e condições de oxirredução, influenciam a concentração dos elementos traços e, conseqüentemente, a sua disponibilidade para as plantas (CARVALHO et al., 2008; SANTOS, 2009).

Os metais pesados sofrem várias reações químicas e bioquímicas no solo, as quais podem alterar suas solubilidades e mobilidades e,

consequentemente, a disponibilidade e toxicidade para as biotas. A acidificação do solo, por exemplo, geralmente aumenta a solubilidade de metais da forma livre, M^+ , que é a espécie mais tóxica para biota. Por outro lado, os complexos organometálicos, M^+L^- (em que L^- é ligante orgânico), são solúveis em pH próximo de neutro, mas são menos tóxicos que na forma livre, M^+ (MARSOLA; MIYAZAWA; PAVAN, 2005).

2.1.2 Chumbo (Pb)

O Pb é um metal relativamente abundante na crosta terrestre e sua concentração média pode variar de 10 a 20 mg kg⁻¹. As atividades de mineração e fundição são uma das mais importantes fontes de emissão deste metal. Além disso, o Pb está presente em diversas formas de produtos e materiais, como cerâmicas, soldas, munições, pilhas e baterias, além de ser também amplamente utilizado na fabricação de tintas (PAOLIELLO; CHASIN, 2001).

A carga deste contaminante existente nos vegetais é normalmente gerada pela captação deste metal pelas raízes, mas também pode ser incorporada aos vegetais durante os processos de industrialização, ou no preparo doméstico, especialmente quando são utilizados utensílios de cerâmica, chumbo-cristal ou metálicos (OGA, 1996).

O Pb, em sua forma catiônica Pb^{2+} , é absorvido pelas plantas devido à sua semelhança com os metais de transição essenciais, diferindo no que se refere à translocação nas plantas, devido à sua facilidade de formar complexos com elevado impedimento estérico (SILVA et al., 2007a, 2007b). As altas concentrações de Pb interferem na divisão celular e inibem a extensão do sistema radicular e concentrações abaixo do nível considerado tóxico podem estimular o crescimento radicular (BALIGAR; FAGERIA; ELRASHIDI, 1998; BERGMANN, 1992). A diminuição do processo respiratório, causada pela

redução na assimilação de CO₂, provoca redução no crescimento. A interrupção do metabolismo do Ca e a inativação enzimática também são provocadas pela toxicidade de Pb nas plantas (BERGMANN, 1992).

A habilidade do Pb em deslocar outros elementos, como K, Ba, S e Ca em minerais e sítios de adsorção, deve-se à sua semelhança com os metais alcalinos terrosos, conferindo-lhe também a característica de ser um dos metais pesados menos móveis e que se acumulam naturalmente nos horizontes superficiais. Os minerais de argila, oxi-hidróxidos de Fe e Al, além da matéria orgânica, são os principais pontos de associação do Pb, que pode ser encontrado, algumas vezes, concentrado em partículas de CaCO₃ ou em fosfatos (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001).

2.1.3 Cádmio (Cd)

O Cd é um elemento não essencial à vida humana e potencialmente tóxico em baixas concentrações. Na natureza, é encontrado juntamente com os minérios de Zn, geralmente carbonatos, o que explica as várias propriedades físicas e químicas semelhantes ao Zn, como estrutura iônica e eletronegatividade (CARVALHO, 2006).

Entre os metais pesados, o Cd destaca-se por apresentar maior risco ambiental, em razão do seu uso intenso, toxicidade e ampla distribuição. O Cd é um elemento não essencial que afeta negativamente o crescimento e o desenvolvimento das plantas, sendo vastamente utilizado na fabricação de plásticos coloridos, pigmento de tintas, fabricação de baterias de automóveis, entre outros (BAIRD, 2002).

A contaminação dos alimentos é a mais importante via de exposição de Cd para o homem (SILVA et al., 2005) e a sua presença pode causar mudanças morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e estruturais nos vegetais. O Cd pode

diminuir o crescimento, reduzir a taxa de fotossíntese e provocar alterações tanto enzimáticas quanto metabólicas. Isso ocorre devido a alterações provocadas por esse metal nos estômatos, no transporte de elétrons, no ciclo de Calvin, na estrutura do grana e na síntese de clorofila e na fosforilação oxidativa (BARCELÓ; VASQUES; POSCHENRIEDER, 1988). No entanto, os efeitos do Cd variam em função do tempo de exposição da planta ao metal, ou seja, quanto maior o tempo de exposição, maior é a interferência do mesmo sobre os sistemas metabólicos da planta (OLIVEIRA, 2001).

Uma vez no solo, o Cd pode ser absorvido pelas plantas de duas maneiras: passiva (em que a captura envolve difusão dos íons da solução do solo para dentro da endoderme) ou ativa (por gradiente de concentração, requerendo energia metabólica). Após ter sido absorvido através das raízes, o metal pode ser transportado pelos vasos do xilema, possibilitando a sua movimentação por toda a planta. Nas folhas, os íons metálicos podem ser incorporados dentro de proteínas ou translocados através do floema, junto com fotoassimiladores, causando uma série de fitotoxicidades (ALLOWAY, 1995).

Normalmente, o Cd é retido nas raízes e somente pequenas quantidades são transportadas para a parte aérea, acumulando-se, principalmente, nas folhas. Contudo, os íons de Cd na parte aérea das plantas podem ser translocados para os frutos em desenvolvimento via transporte mediado pelo floema (HART et al., 1998). Isso acontece porque os frutos e as sementes dependem principalmente das folhas, que são as fontes primárias de açúcares, para o crescimento e o acúmulo de reservas e esta matéria prima chega quase que exclusivamente pela seiva do floema. Assim, o metal pode entrar na cadeia alimentar por meio dos cereais e/ou outras partes comestíveis das plantas, causando neurotoxicidade, hepatotoxicidade e nefrotoxicidade. Além disso, o cádmio é um agente comprovadamente cancerígeno e teratogênico (HENRIQUES, 2008).

O cádmio, quando incorporado ao fruto, pode também afetar negativamente os constituintes de reserva das sementes, acarretando prejuízos e/ou dificuldades a germinação, a qual depende, principalmente, das substâncias de reservas. Do mesmo modo, íons de cádmio podem causar danos irreversíveis às sementes, comprometendo sua viabilidade (HENRIQUES, 2008).

2.2 Influências dos metais pesados na absorção e na translocação de minerais nas plantas

As plantas necessitam de água, macro e micronutrientes para sobreviver e os absorvem, principalmente, pelas raízes, que estão em contato com o solo e a água. Em pequenas quantidades, alguns desses elementos metálicos são necessários para a obtenção de uma planta saudável, sendo a sua absorção facilitada por mecanismos próprios de transporte e acumulação. No entanto, as plantas não conseguem evitar totalmente a entrada de metais tóxicos pelo mesmo mecanismo e os elementos traços podem ser absorvidos pelo sistema radicular das plantas e translocados via xilema para a parte aérea, por meio da transpiração (HENRIQUES, 2008).

Segundo Horn et al. (2006), a absorção de nutrientes pelo sistema radicular, tanto em solos quanto em solução nutritiva, varia conforme sua morfologia e fisiologia e pode acontecer por meio de interceptação radicular, fluxo de massa ou difusão, além de serem absorvidos em taxas diferenciadas de acordo com a necessidade de cada vegetal. Os nutrientes podem ser classificados em macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), exigidos em maior quantidade pelo vegetal e micronutrientes (B, Cl, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se e Zn), exigidos em quantidades menores (CASTRO, 2007). Entre os micronutrientes aparecem vários metais pesados classificados como essenciais: Cu, Fe, Mn, Mo, Ni e Zn, que são elementos indispensáveis para o desenvolvimento das plantas;

benéficos: Co, Na, Se e Si, que colaboram com o desenvolvimento das plantas, mas sua falta não é considerada um fator limitante e não essenciais ou tóxicos: Cd, Cr, Hg, Pb, entre outros, sendo elementos prejudiciais às plantas (GONÇALVES JÚNIOR; LUCHESE; LENZI, 2000).

Yang et al. (1996a) observaram que a absorção de Zn, Fe, Cu, Mn, Ca e Mg diminuiu com o aumento das doses de Cd em milho, azevém, trevo-branco e repolho. A absorção de P aumentou em milho e azevém, mas, em trevo branco e repolho, houve um efeito quadrático, aumentando até certo ponto e diminuindo com o aumento da dose de Cd.

Em estudos realizados por Paiva, Carvalho e Siqueira (2000) com mudas de cedro e ipê-roxo, o teor dos macro e micronutrientes foi afetado de forma diferenciada com a espécie, o nutriente, a parte da planta e o metal pesado aplicado. Cd, Ni e Zn translocaram-se em grandes quantidades para a parte aérea, enquanto Pb concentrou-se no sistema radicular das duas espécies. Avaliações de produção de matéria seca de raiz, parte aérea e total mostraram redução significativa com a presença dos metais, independente das doses. A translocação de macronutrientes praticamente não foi afetada, enquanto a translocação de micronutrientes foi reduzida pela presença de Cd, Ni e Zn. À medida que aumentaram as doses dos metais pesados, aumentou a translocação de Cd, Ni e Zn para a parte aérea.

Em estudos realizados com feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), Carvalho et al. (2008) concluíram que, nas doses de 125 mg dm^{-3} e 250 mg dm^{-3} em um Latossolo Vermelho Amarelo húmico e entre as doses 250 mg dm^{-3} e 500 mg dm^{-3} , a produção da matéria seca de parte aérea e matéria seca de raiz foi reduzida conforme o aumento das doses de metais no feijoeiro.

A translocação refere-se ao movimento ou à transferência do íon do local de absorção na raiz para outro qualquer, dentro ou fora da raiz (FAQUIM, 1994). Já índice de translocação refere-se ao movimento ou à transferência do

ion da raiz para a parte aérea, sendo representado pela porcentagem da quantidade total absorvida que foi transferida para a parte aérea (ABICHEQUER; BOHNEN, 1998).

A presença de metais pesados, ao afetar o índice de translocação dos minerais nos vegetais, pode provocar uma série de desarranjos fisiológicos nas plantas, pois se passa a ter deficiência ou excesso de determinados nutrientes na parte aérea, o que prejudica o desenvolvimento e o crescimento normal das plantas (PAIVA; CARVALHO; SIQUEIRA, 2002).

No entanto, em alguns casos em que os metais se encontram disponíveis no solo a absorção e a translocação do elemento por meio do tecido das plantas podem ocorrer de forma reduzida ou mesmo não ocorrer. Isto é explicado por um mecanismo de proteção das plantas que bloqueia o elemento quando esse ainda se encontra no solo, ou mesmo quando o elemento se encontra no interior das raízes, onde são barrados por camadas de células que compõem a endoderme (CARVALHO et al., 2008).

2.3 Cultivo em solução nutritiva

A deficiência de nutrientes nos solos agrícolas representa uma preocupação crescente, com tendência a se acentuar num futuro próximo. O cultivo em solos de baixa fertilidade, a calagem e o aumento da produtividade são fatores que têm favorecido o aumento das deficiências de elementos essenciais para o desenvolvimento vegetal.

Normalmente, quando comprovada a deficiência desses nutrientes, o agricultor procura suprir a falta desses elementos com a aplicação de fertilizantes específicos. Os fertilizantes utilizados para suprir esses nutrientes possuem uma composição que, além dos elementos desejáveis, também, em

geral, contêm metais pesados tóxicos (GONÇALVES JÚNIOR; LUCHESE; LENZI, 2000).

A técnica de cultivo em solução nutritiva, além de representar uma alternativa válida diante da diminuição das áreas de plantio em solos, tem permitido avanços no conhecimento da nutrição das plantas, pois se pode controlar mais adequadamente a composição da solução e eliminar a heterogeneidade e a complexidade do solo, além de diminuir a contaminação dos vegetais com elementos traços tóxicos. No cultivo em solução hidropônica, todos os nutrientes são oferecidos às plantas na forma de solução. Esta solução é preparada com sais fertilizantes e existem vários sais que fornecem esses nutrientes para as plantas (ALBERONI, 1998).

Um dos princípios básicos para a produção vegetal, tanto no solo como sobre sistemas de cultivo sem solo (hidropônico), é o fornecimento de todos os nutrientes de que a planta necessita.

O solo, além de sustentar as raízes das plantas, também é importante para fornecer oxigênio, água e minerais. Ele é formado por partículas de minerais e material orgânica, e apresenta poros e microporos que ficam cheios de água e ar. Geralmente, na água estão dissolvidos sais formando a solução do solo, que leva os nutrientes para as plantas. Em um meio sem solo (cultivo hidropônico), as plantas também deverão supridas em suas necessidades minerais e, para entender as relações existentes entre as plantas e o sistema hidropônico, devem ser levadas em conta as relações que existem entre seu crescimento e o solo (ALBERONI, 1998) para, então, avaliar as condições necessárias para o bom desenvolvimento do vegetal.

A hidroponia é uma técnica bastante difundida em todo o mundo e seu uso tem aumentado em muitos países. Sua importância não é somente pelo fato de ser uma técnica para investigação hortícola de produção de vegetais, mas também está sendo empregada como uma ferramenta para resolver um amplo

leque de problemas, que incluem tratamentos que reduzem a contaminação do solo e da água subterrânea, e manipulação dos níveis de nutrientes no produto (CASTELLANE; ARAÚJO, 1995).

A hidroponia, ou cultura hidropônica (termos derivados de dois radicais gregos - *hydro*, que significa água e *ponos*, que significa trabalho), vem se desenvolvendo rapidamente como um meio de produção vegetal, sobretudo de hortaliças sob cultivo protegido, em que o solo é substituído por uma solução aquosa contendo apenas os elementos minerais indispensáveis aos vegetais (FURLANI et al., 1999).

O cultivo sem solo proporciona bom desenvolvimento das plantas, bom estado fitossanitário, além das altas produtividades, quando comparado ao sistema tradicional de cultivo no solo. Quando utiliza apenas meio líquido, associado ou não a substratos não orgânicos naturais, podem-se utilizar os termos cultivo ou sistema hidropônico (CASTELLANE; ARAÚJO, 1995).

2.4 Cultivo de tomate

A tradição da horticultura no Brasil vem dos anos 1950, tendo sido iniciada por imigrantes italianos e japoneses. As hortaliças constituem um grande grupo de plantas alimentares que se caracterizam pelo sabor e alto valor nutritivo, principalmente pela presença das vitaminas e dos sais minerais imprescindíveis à regulação do metabolismo. As hortaliças são de grande valor na alimentação, apesar de não existir o hábito de incluí-la diariamente em nossas refeições.

Em termos socioeconômicos, o tomate é importante pelo volume da produção e geração de empregos. São quase quatro milhões de hortas cultivadas com a espécie. É considerada uma espécie cosmopolita, cultivada no mundo todo, sendo China, Estados Unidos e Índia os principais produtores. O Brasil é o

oitavo maior produtor mundial (CHAVES; MELO, 2006). A área de cultivo do tomate no país chega a 60 mil hectares, com rendimento médio de 60 mil kg/hectare e a produção que atinge 3,7 milhões de toneladas. O sudeste é a região que se destaca por apresentar maior produção (cerca de 20 mil hectares de área de cultivo, com rendimento médio de 65 mil quilos/hectare, e produção de 1,4 milhões de toneladas). São Paulo é o estado de maior destaque, por possuir uma área de cultivo de 10 mil hectares, com rendimento médio de 63 mil kg/hectare e produção que atinge 642 mil toneladas. Na região nordeste, os estados da Bahia e de Pernambuco são os principais produtores de tomate; o primeiro com área de cultivo de 6 mil hectares e produção de 280 mil toneladas e o segundo estado, com área de cultivo de 3 mil hectares e produção que atinge 156 mil toneladas (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2010).

De acordo com Alvarenga (2004), o tomateiro é uma planta perene, de porte arbustivo, sendo cultivada anualmente. A planta pode desenvolver-se de forma rasteira, semiereta ou ereta. As condições mais adequadas para seu cultivo são em ambientes quentes, com boa iluminação e drenagem.

A cultivar Santa Clara, lançada pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), surgiu a partir do cruzamento entre as cultivares Ângela e o híbrido F₁ Duke, considerado um ótimo material, em virtude de ser resistente a *Verticilium* e *Alternaria*. Atualmente, a cultivar Santa Clara tornou-se padrão comparativo para todos os tomateiros do grupo Santa Cruz (ALVARENGA, 2004).

3 MATERIAL E MÉTODO

Os experimentos foram conduzidos em Laboratórios dos Departamentos de Ciência do Solo e de Química e em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, MG, em solução nutritiva. A pesquisa foi conduzida no período de 26/03/2010 a 04/08/2010, correspondente ao ciclo vegetativo das plantas de tomate.

3.1 Instalação e condução dos ensaios experimentais

As sementes de tomate utilizadas, *Lycopersicum esculentum* cultivar Santa Clara, foram colocadas em bandeja de isopor com um substrato comercial (Plantmax), sendo irrigadas com água desmineralizada, de forma a mantê-las úmidas durante 21 dias. Quando estavam com altura aproximada de 10 cm, as mudas foram transplantadas para uma bandeja com solução de Clark, permanecendo em adaptação durante duas semanas; na primeira semana, com 25% da concentração máxima da solução e na semana seguinte, com 50% da concentração. Decorrido esse período, o experimento foi montado em potes individuais com solução de Clark a 75%, incluindo a adição dos metais Cd e Pb. Uma vez por semana era feita a troca de solução nutritiva a 75% de concentração máxima e a adição dos metais. Os 75% da concentração máxima foram suficientes para um bom cultivo do tomate.

Foram utilizados frascos plásticos, opacos, com capacidade de aproximadamente 3L, nos quais as plantas escolhidas de tomate se desenvolveram. A solução foi arejada constantemente por tubulações de plástico ligadas a um moto-compressor. Ao final do ciclo vegetativo, as plantas foram colhidas, separadas em parte aérea, sistema radicular e frutos, e lavadas com água deionizada. As raízes e a parte aérea foram secas em estufa em temperatura

entre 65° e 70°C, até peso constante. Os frutos foram congelados a -80°C e em seguida foram levados ao Departamento de Ciência dos Alimentos, para liofilização em um aparelho Liobrás L202, à temperatura de -50°C. Em seguida, o material foi pesado e, posteriormente, triturado em moinho tipo Willey, equipado com peneira de 20 cm².

Na Tabela 1 são apresentados os constituintes e suas quantidades para a solução nutritiva de Clark (1975), sendo as concentrações minerais consideradas padrões para cultivos hidropônicos afins.

Tabela 1 Solução nutritiva de Clark

Solução estoque	Concentração das soluções estoque		Solução trabalho mL L ⁻¹
	mol L ⁻¹	mmol L ⁻¹	
Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	1	-	2,53
KNO ₃	1	-	1,30
KCl	1	-	0,50
NH ₄ NO ₃	1	-	0,90
MgSO ₄ .7H ₂ O	1	-	0,60
MnCl ₂ .4H ₂ O	-	7	1,0
H ₃ BO ₃	-	19	1,0
ZnSO ₄ .7H ₂ O	-	2	1,0
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ .4H ₂ O	-	0,086	1,0
CuSO ₄ .5H ₂ O	-	0,5	1,0
KH ₂ PO ₄	-	69,04	1,0
Fe-EDTA			1,0

3.2 Aplicação dos metais Cd e Pb

No intuito de avaliar a tolerância do tomateiro a concentrações mais altas dos metais, foi realizado um teste com quatro plantas, duas contendo doses de Cd 2 e 4 mg L⁻¹ e duas com Pb 20 e 40 mg L⁻¹. As plantas não resistiram aos tratamentos e, a partir de então, utilizaram-se as concentrações crescentes de cádmio (Cd), 0; 0,025; 0,1; 0,5; 1,0 mg L⁻¹ e chumbo (Pb), 0; 0,25; 1,0; 5,0; 10,0 mg L⁻¹, adicionados à solução nutritiva de Clark, utilizando o sais p.a. nitrato de cádmio Cd(NO₃)₂.4H₂O e nitrato de chumbo Pb(NO₃)₂ como fonte do elemento contaminador. As doses foram escolhidas levando-se em conta valores capazes de “intoxicar sem eliminar” as plantas durante o cultivo (MALAVOLTA, 1994). Esta decisão foi motivada pela necessidade de obtenção de material vegetal suficiente para as análises laboratoriais.

3.3 Análises espectrofotométricas

Para a determinação do teor dos elementos, fez-se a digestão nitroperclórica na proporção de 2:1 (v/v) de HNO₃ e HClO₄. Os teores de P foram determinados por colorimetria, os de S por turbidimetria, sendo os comprimentos de ondas de 420 nm e 462 nm, respectivamente, e os teores de K por fotometria de chama, utilizando-se um comprimento de onda de 766,5 nm. Os teores de Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn, Cd e Pb da matéria seca da parte aérea (MSPA), do sistema radicular (MSR) e dos frutos (MSF) foram dosados utilizando-se um espectrofotômetro de absorção atômica Varian com chama de gás acetileno e lâmpadas de cátodo oco (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Os parâmetros utilizados na determinação dos teores dos elementos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 Parâmetros espectroscópicos utilizados na determinação dos teores dos elementos

Elementos	Comprimento de onda (nm)	Fenda
Ca	422,7	0,5
Mg	285,2	0,5
Fe	248,3	0,2
Cu	324,7	0,2
Mn	279,5	0,2
Zn	213,9	0,2
Cd	228,8	0,5
Pb	217	1,0

3.4 Avaliação experimental

Por meio do índice de translocação (IT) foi possível avaliar a capacidade das espécies em translocar os macro e os micronutrientes da raiz para a parte aérea e raiz, parte aérea para os frutos, conforme Paiva, Carvalho e Siqueira (2002), em que o IT é calculado pela expressão:

$$IT_{pa}(\%) = \frac{\text{teor MSPA}}{\text{teor (MSR + MSPA + MSF)}} \times 100$$

$$IT_f(\%) = \frac{\text{teor MSF}}{\text{teor (MSR + MSPA + MSF)}} \times 100$$

3.5 Delineamento estatístico

O delineamento estatístico adotado foi inteiramente casualizado, com cinco tratamentos (0; 0,025; 0,1; 0,5 e 1,0 mg L⁻¹ de Cd) e (0; 0,25; 1,0; 5,0 e 10,0 mg L⁻¹ de Pb) quatro repetições, sendo cada repetição representada por um vaso com uma planta, perfazendo, assim, um total de 40 plantas (parcelas experimentais).

Os dados foram submetidos à análise de variância, sendo ajustadas equações de regressão para o teor e o índice de translocação dos diferentes elementos analisados, utilizando-se o programa SISVAR (FERREIRA, 2000). Os Gráficos de respostas, com base nas regressões, foram produzidas no aplicativo Origin.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As equações de regressão ajustadas para os teores e o índice de translocação para os macro e micronutrientes na raiz, parte aérea e nos frutos do tomateiro, em função das doses de cádmio e chumbo aplicadas em solução nutritiva, mostram que os metais afetam esses parâmetros de forma diferenciada para cada parte da planta e para cada nutriente.

4.1.1 Teor de P, K, Ca, Mg e S sob influência de doses diferentes de Cd

Nos Gráficos 1 e 2 encontram-se os dados médios relativos ao teor de macronutrientes das plantas de tomate sob diferentes doses de cádmio.

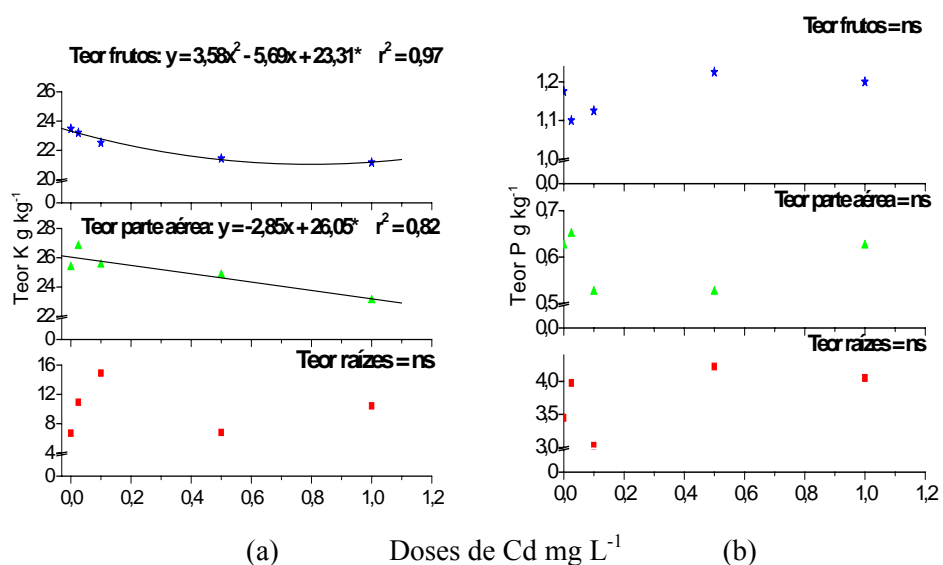
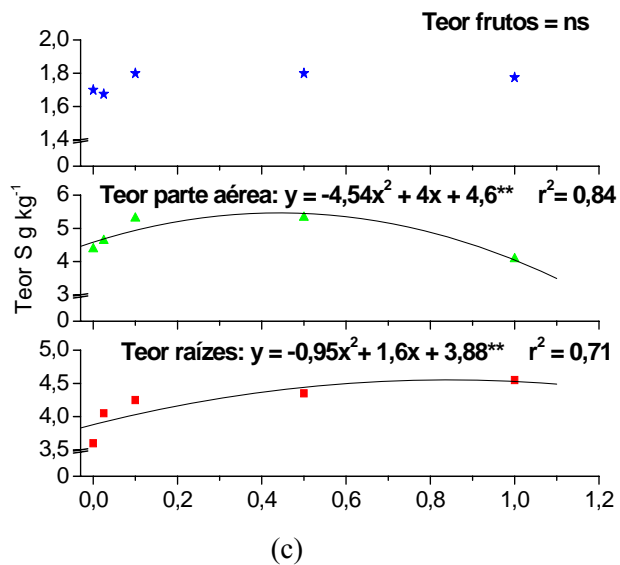
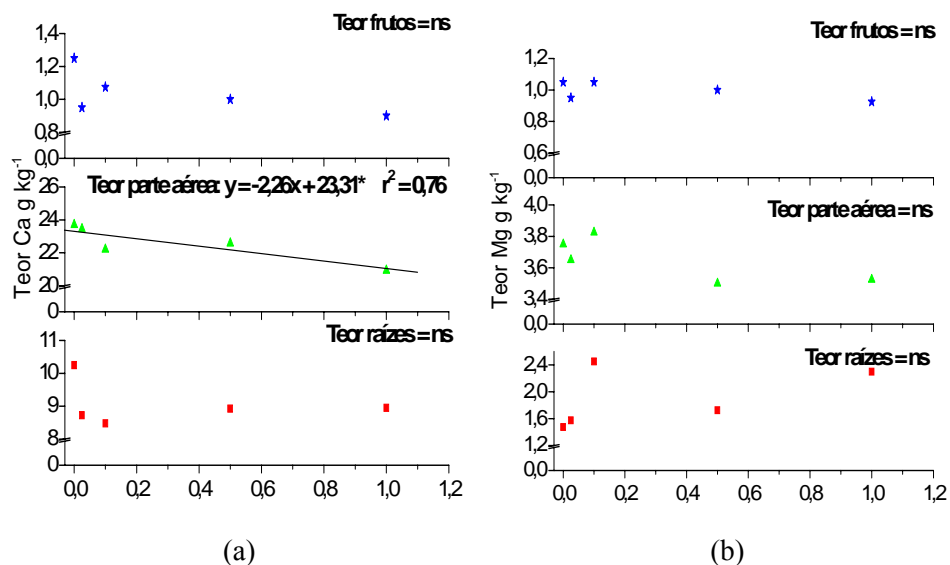


Gráfico 1 Teores de macronutrientes K (a) e P (b), nos frutos, parte aérea e raízes de plantas de tomate, em função de doses diferentes de cádmio (*significativo a 5% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)



Doses de Cd mg L⁻¹

Gráfico 2 Teores de macronutrientes Ca (a), Mg (b) e S (c), nos frutos, parte aérea e raízes de plantas de tomate, em função de doses diferentes de cádmio (*e** significativo a 5% e a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)

No Gráfico 1a estão dispostos os teores de K analisados no tomateiro, onde se observa uma resposta quadrática positiva nos frutos, sendo o teor máximo de $23,48 \text{ g kg}^{-1}$ no tratamento controle e, a partir da aplicação das doses de Cd, a absorção de K pelos frutos foi reduzida. Na parte aérea houve uma diminuição linear, afetando o teor de K e na raiz não houve variação significativa no teor de K quanto à aplicação de Cd. Essa redução no teor de K é, possivelmente, explicada pela inibição competitiva entre o K e o Cd^{2+} presente em altas concentrações (PAIVA, 2000).

Para o P (Gráfico 1b) não houve efeito significativo do Cd sobre seu teor nas diferentes partes da planta. No entanto, até a maior dose aplicada ($1,0 \text{ mg L}^{-1}$ de Cd) não atingiu grau de deficiência, pois, de acordo com Alvarenga (2004), os sintomas de deficiência de P no tomateiro não são muito evidentes.

Os teores de Ca nas raízes e frutos da planta (Gráfico 2a) não apresentaram efeito significativo. No entanto, na parte aérea houve redução no teor de Ca com a aplicação de Cd, variando entre $23,7 \text{ g kg}^{-1}$ a $20,9 \text{ g kg}^{-1}$. Os resultados obtidos confirmam as observações de Gussarson (1994) e Gussarson et al. (1996) que trabalharam com *Betula pendula* e observaram que o teor de Ca diminuiu com a aplicação de Cd. Essa redução no teor de Ca é possivelmente explicada pelo efeito de competição entre este elemento como cátion divalente e o Cd^{2+} presente em altas concentrações durante o processo de absorção (MARSCHNER; GODBOLD; JENTSCHKE, 1995; WALKER; MILLER; HASSETT, 1977), muitas vezes caracterizado como antagonismo (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001).

Os dados mostram que os teores de Mg nas partes da planta não apresentaram efeitos significativos quanto à aplicação de Cd, conforme mostrado na Gráfico 2b. De acordo com Alvarenga (2004), os teores de Mg considerados normais em tomateiro são de 4 a 8 g kg^{-1} , com base nas folhas

adjacentes ao segundo cacho no completo florescimento e nas folhas adjacentes ao terceiro cacho no completo florescimento.

Nos frutos do tomateiro não houve efeito significativo quanto ao teor de S em função da aplicação de Cd (Gráfico 2c). Observou-se que na raiz e na parte aérea a resposta foi quadrática negativa e em ambos os casos os menores teores ocorreram no tratamento controle. Segundo Brune, Urbach e Dietz (1995), um aumento na produção de grupos tiólicos, precursores das fitoquelatinas possivelmente é o responsável por tal aumento no teor de S. A síntese de fitoquelatinas é induzida pela presença de Cd, sendo este um possível mecanismo de tolerância das plantas a esse metal pesado.

Embora seja prejudicial às plantas e aos seres vivos em geral, pode-se sugerir que as concentrações de cádmio utilizadas não influenciaram a absorção dos macronutrientes, com exceção de Ca e K que, em ambos os casos, apresentaram redução nos teores na parte aérea. Essas reduções nos teores dos cátions Ca^{2+} e K^{+} são explicadas, possivelmente, pela inibição competitiva entre esses cátions e o Cd^{2+} .

4.1.2 Teor de Cu, Mn, Zn e Fe sob influência de doses diferentes de Cd

No Gráfico 3 encontram-se os dados médios relativos ao teor de micronutrientes das plantas de tomate sob diferentes doses de cádmio.

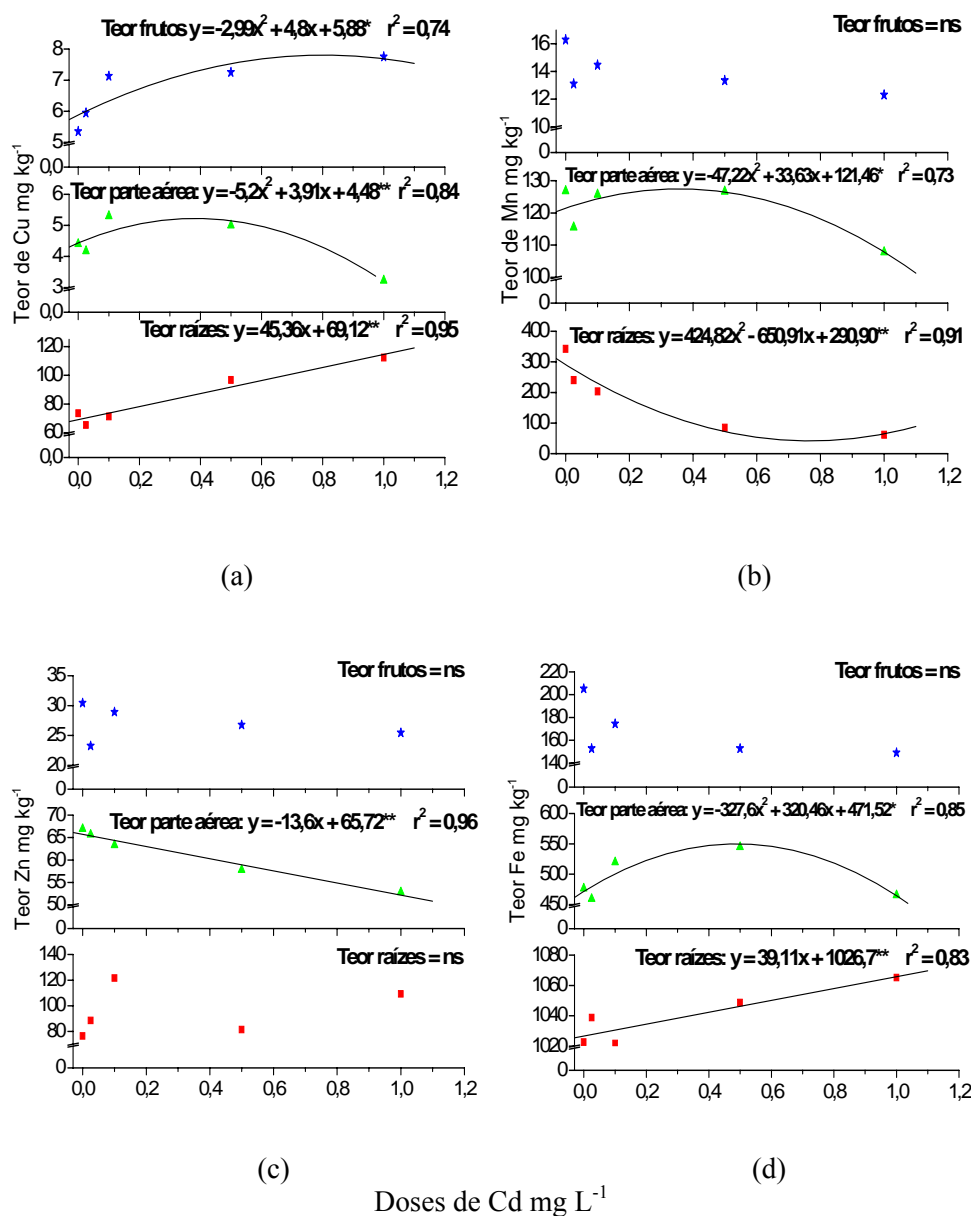


Gráfico 3 Teores de micronutrientes Cu (a), Mn (b), Zn (c) e Fe (d), nos frutos, parte aérea e raízes de plantas de tomate, em função de doses diferentes de cádmio (*e** significativo a 5% e a 1% de probabilidade e ns, não significativo pelo teste F).

Nas raízes, o teor de Cu (Gráfico 3a) aumentou de forma linear, confirmando a afirmação de Obata e Umebayashi (1997) de que o Cd induz o aumento no teor radicular de Cu em diferentes espécies. Resultados semelhantes foram obtidos por Paiva, Carvalho e Siqueira (2001), trabalhando com mudas de Cedro (*Cedrela fissilis*) e por Gussarson et al. (1996), trabalhando com Bétula (*Betula pendula*). Kabata-Pendias e Pendias (2001) afirmam que a presença de Cd provoca interação com a absorção de Cu, podendo, em algumas espécies, ser antagônica e, em outras, sinérgica; no presente caso, a interação foi sinérgica. Na parte aérea, a resposta quadrática negativa apresentou teor máximo de Cu em uma concentração de Cd intermediária ($0,1 \text{ mg L}^{-1}$). No entanto, nos frutos, o teor máximo de Cu foi atingido na maior dose de Cd $1,0 \text{ mg L}^{-1}$. Obata e Umebayashi (1997) preconizam que o Cd estimula a absorção de Cu, porém, restringe seu transporte para a parte aérea.

No Gráfico 3b observa-se que o teor de Mn nos frutos das plantas de tomate não apresentou efeito significativo quanto à aplicação de Cd. Na parte aérea, o teor de Mn apresentou resposta quadrática negativa, demonstrando que a presença de Cd até a dose $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ exerce efeito sinérgico sobre a absorção de Mn e que, a partir daí, passa a apresentar efeito antagônico, conforme mencionado por Kabata-Pendias e Pendias (2001). Nas raízes observou-se efeito contrário ao da parte aérea, obtendo-se resposta quadrática positiva com o teor de Mn diminuindo à medida que as concentrações de Cd foram aumentando. Redução na absorção de Mn foi observada em diferentes espécies, com a aplicação de Cd (GUSSARSON, 1994; GUSSARSON et al., 1996; SOARES, 1999; WALLACE et al., 1977; YANG et al., 1996a).

O teor de Zn nos frutos e nas raízes das plantas de tomate (Gráfico 3c) não apresentou efeito significativo. Em várias espécies de plantas a absorção de Zn foi reduzida pela presença de Cd (JALIL; SELLES; CLARKE, 1994; NASCIMENTO; FONTES; NEVES, 1998; SOARES, 1999; YANG et al.,

1996a), fato confirmado pela parte aérea que apresentou redução linear no teor de Zn. A parte aérea apresentou redução no teor de Zn de 67 mg kg^{-1} no tratamento controle para 53 mg kg^{-1} na maior dose de Cd aplicada ($1,0 \text{ mg L}^{-1}$).

No Gráfico 3d observa-se que o teor radicular de Fe apresentou resposta linear positiva, demonstrando que a presença de Cd exerce efeito sinérgico estimulando a absorção de Fe. A parte aérea apresentou resposta quadrática negativa, comprovando que até certa dose a presença de Cd exerce efeito sinérgico sobre a absorção de Fe e que, a partir daí, passa a apresentar efeito antagônico, conforme mencionado por Kabata-Pendias e Pendias (2001). Já os frutos não apresentaram efeito significativo quanto à aplicação de Cd na solução nutritiva. De acordo com Yang et al. (1996a), a aplicação de metais pesados pode restringir o transporte de Fe, em várias espécies de plantas.

Embora os dados evidenciem sinérgico entre aplicação de Cd^{2+} e absorção de micronutrientes, esse comportamento deve ser interpretado com cuidado. Afinal, Cd^{2+} é um metal não essencial e, de forma comprovada, deletério as plantas e aos seres vivos em geral.

4.1.3 Índice de translocação (IT) dos macronutrientes sob influência de doses diferentes de Cd

Os efeitos do aumento das doses de Cd sobre os índices de translocação (IT) de P, K, Ca, Mg, S são apresentados nos Gráficos 4 e 5.

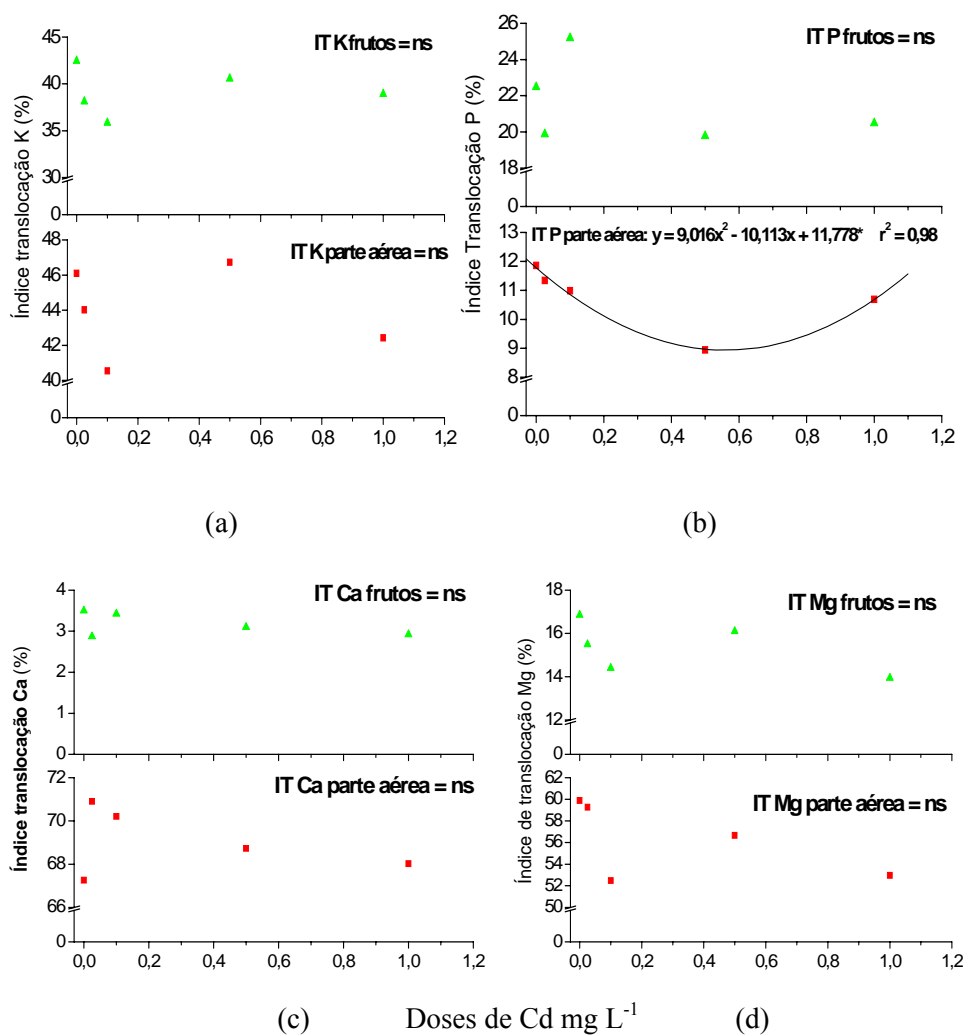
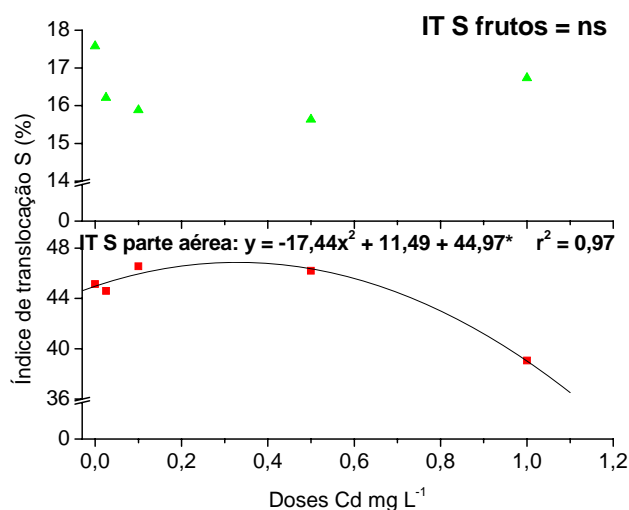


Gráfico 4 Índice de translocação de macronutrientes K (a), P (b), Ca (c) e Mg (d), nos frutos e parte aérea do tomateiro, em função de doses diferentes de cádmio (* significativo a 5% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)



(a)

Gráfico 5 Índice de translocação do macronutriente S (a), nos frutos e parte aérea do tomateiro, em função de doses diferentes de cádmio (* significativo a 5% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)

Nos Gráficos 4a, 4c e 4d, referentes aos índices de translocação de K, Ca e Mg respectivamente, observa-se efeito não significativo das doses de Cd sobre essas variáveis. Estes dados contrastam-se com os resultados obtidos por Paiva (2000), trabalhando com mudas de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) e aplicando diferentes concentrações de Cd. Os três elementos apresentaram respostas quadráticas negativas, havendo redução no IT na maior dose aplicada. Yang et al. (1996a) também verificaram que a translocação de Ca e Mg foi reduzida com a presença de Cd em milho e repolho.

Para o índice de translocação de P nos frutos do tomateiro (Gráfico 4b) não foi encontrado efeito significativo das doses de Cd, diferente do que ocorreu com o IT para a parte aérea, em que houve uma resposta quadrática positiva com o ponto mínimo na dose de 0,5 mg L⁻¹. O aumento na translocação de P para a

parte aérea foi observado em várias espécies vegetais com a aplicação de Cd (YANG et al., 1996a), em solução nutritiva.

O IT de S na parte aérea do tomateiro (Gráfico 5a) apresentou resposta quadrática negativa, atingindo um máximo de translocação na concentração de Cd $0,1 \text{ mg L}^{-1}$, enquanto nos frutos não foi exercido, pelas doses de Cd, um efeito significativo. Paiva (2000), trabalhando com mudas de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) e cedro (*Cedrela fissilis* Vell.), obteve diferentes resultados; no ipê, o IT de S aumentou linearmente, ao passo que as mudas de cedro apresentaram resposta quadrática positiva. A translocação de S, diante da aplicação de metais pesados, pode ser estimulada ou inibida, mostrando comportamento diferenciando entre as espécies (YANG et al., 1996a, 1996b).

De acordo com esses resultados, pode-se sugerir, de modo geral, que as concentrações de cádmio utilizadas não afetaram a movimentação dos macronutrientes nas diferentes partes do tomateiro, à exceção do P e S, ambos na parte aérea. Mas, de qualquer forma, mesmo com as doses utilizadas, a tendência de maior acúmulo de P nos frutos via maior translocação do mesmo (parte aérea-frutos) não foi alterada, tendo ocorrido o mesmo para o S, em menor magnitude.

4.1.4 Índice de translocação (IT) dos micronutrientes sob influência de doses diferentes de Cd

Os efeitos do aumento das doses de Cd sobre os índices de translocação (IT) de Cu, Mn, Zn, Fe são apresentados na Gráfico 6.

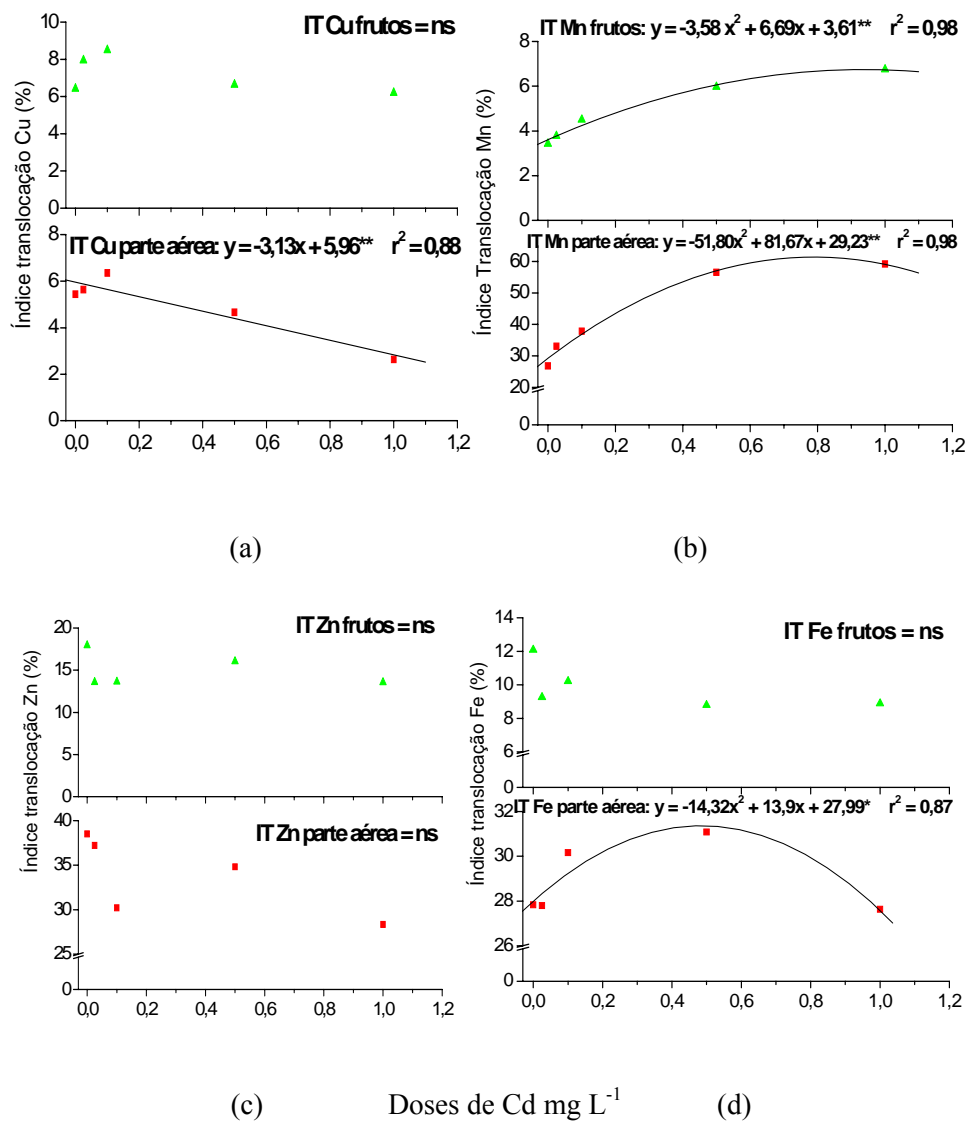


Gráfico 6 Índice de translocação de micronutrientes Cu (a), Mn (b), Zn (c), Fe (d), nos frutos e parte aérea do tomateiro, em função de doses diferentes de cádmio (*e** significativo a 5% e a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)

Observou-se resposta linear negativa para o índice de translocação de Cu na parte aérea das plantas de tomate (Gráfico 6a), ocorrendo diminuição da translocação com o aumento das doses de Cd, ou seja, as doses de Cd utilizadas não afetaram a translocação de Cu para os frutos. Yang et al. (1996a, 1996b) verificaram que a presença de Cd diminuiu a translocação de Cu. Para o mesmo micronutriente, nos frutos não houve efeito significativo. Obata e Umebayashi (1997) concluíram que a presença de Cd restringe a translocação de Cu para a parte aérea.

Pode-se notar um aumento dos índices de translocação de Mn (Gráfico 6b) tanto na parte aérea quanto nos frutos até a maior aplicação de Cd (1 mg L^{-1}), apresentando, em ambos os casos, respostas quadráticas negativas. Esse resultado diverge dos de Soares (1999) que detectou pouca influência de Cd sobre a translocação de Mn em mudas de eucalipto e dos de Yang et al. (1996a, 1996b), que verificaram redução na translocação de Mn, com aplicações de Cd em diferentes espécies, como milho, trevo-branco e repolho.

No Gráfico 6c observa-se que a aplicação de Cd não exerceu efeito significativo sobre o índice de translocação de Zn. Este dado contrastou com aquele encontrado por Paiva (2000). O autor cita que, na presença de concentrações elevadas de Cd, o Zn transloca-se nas plantas em maiores proporções que o normal. Faquin (2005) explica que ocorre uma competição (ou efeito antagônico) entre o zinco e o cádmio quanto à absorção pelas plantas. No entanto, estes resultados contrastam com observações de Yang et al. (1996a, 1996b), em que a presença de Cd diminuiu a translocação de Zn.

Quanto ao índice de translocação de Fe na parte aérea (Gráfico 6d), se observa uma resposta quadrática negativa e uma redução do IT na maior dose do metal aplicado. Esse fato foi observado por Soares (1999) em mudas de eucalipto e por Paiva (2000), em mudas de cedro e ipê-roxo. Não foi encontrado efeito significativo para o IT de Fe nos frutos de tomate sob a influência de Cd e,

ao contrário do eucalipto, cedro e ipê, o tomateiro tem seus frutos como alimento comum em todas as mesas.

À exceção do Cu e o Fe, apenas na dose $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, em que tiveram sua translocação reduzida, ambos na parte aérea, a translocação de todos os micronutrientes foi normal, mesmo sob doses crescentes de Cd. Portanto, é de se esperar que as concentrações de cádmio utilizadas não tenham prejudicado as plantas a ponto de influenciar na translocação dos micronutrientes.

4.1.5 Teor de P, K, Ca, Mg e S sob influência de doses diferentes de Pb

Nos Gráficos 7 e 8 encontram-se os dados médios relativos ao teor de macronutrientes das plantas de tomate sob diferentes doses de chumbo.

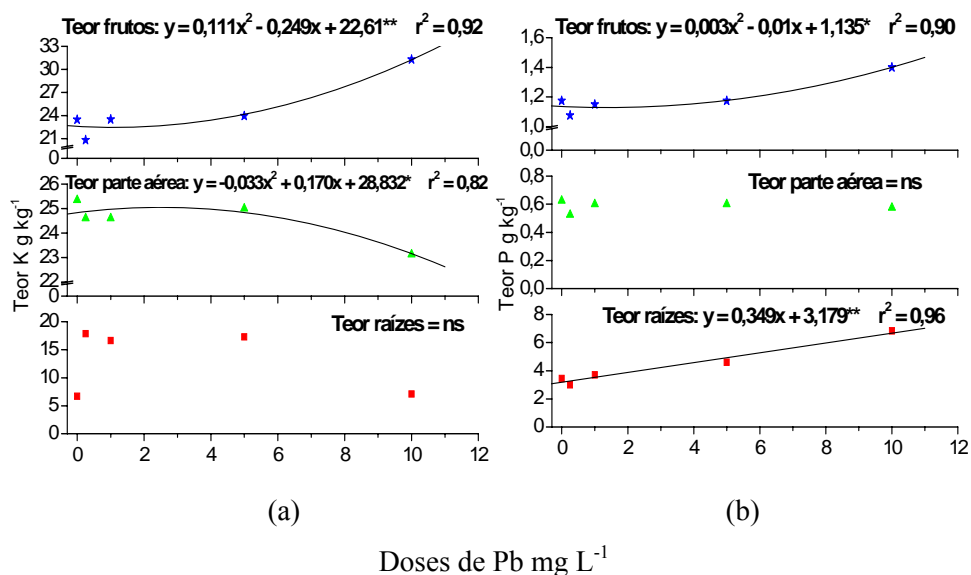
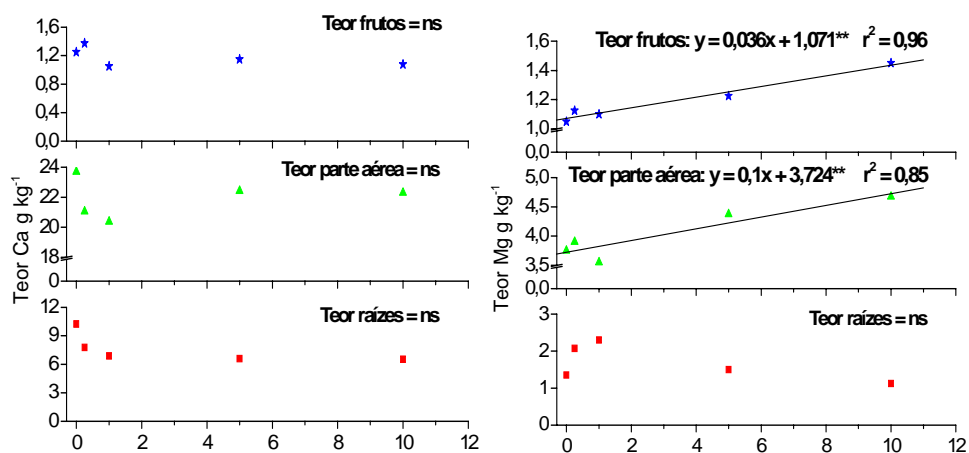
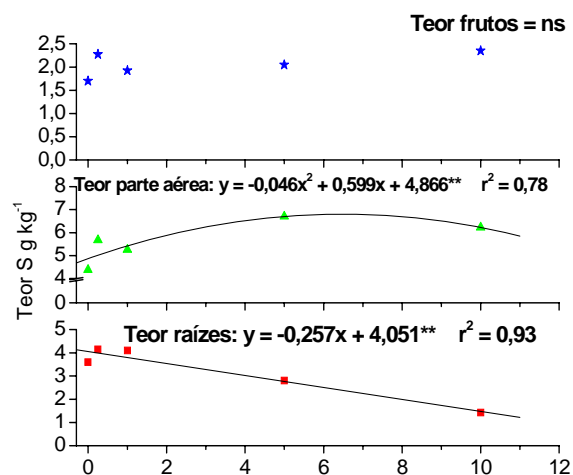


Gráfico 7 Teores de macronutrientes K (a) e P (b), nos frutos, parte aérea e raízes de plantas de tomate, em função de doses diferentes de chumbo (*e** significativo a 5% e a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)



(a)

(b)



(c)

Doses de Pb mg L⁻¹

Gráfico 8 Teores de macronutrientes Ca (a), Mg (b) e S (c) nos frutos, parte aérea e raízes de plantas de tomate, em função de doses diferentes de chumbo (** significativo a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)

No Gráfico (7a), observa-se que não houve efeito significativo das doses de Pb para o teor de K no sistema radicular, enquanto na parte aérea houve redução no teor de K, que, possivelmente, é explicada pela inibição competitiva entre o K e os cátions divalentes presentes em altas concentrações (WALKER; MILLER; HASSETT, 1977). Analogamente, de acordo com Faquin (2005) e Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), nas plantas de modo geral, presença de Mg^{+2} e Ca^{+2} , em altas concentrações, inibe a absorção de K^{+} . Ao contrário do ocorrido na parte aérea, houve um aumento no teor de K nos frutos, obtendo-se uma resposta quadrática positiva e um valor máximo de $31,3 \text{ g kg}^{-1}$. Paiva (2000), trabalhando com mudas de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) e cedro (*Cedrela fissilis* Vell.), também observou aumento no teor de K com aplicação de metais pesados especialmente Pb.

A presença de chumbo em solução nutritiva induziu ao aumento linear do teor radicular de P (Gráfico 7b). Esse aumento no teor radicular de P pode ser explicado pela precipitação do fósforo na forma de fosfato de chumbo, o que, segundo Kabata-Pendias e Pendias (2001), é esperado pela facilidade de combinação do Pb^{2+} com ânions $H_2PO_4^-$, forma predominante de absorção do P. O teor de P nos frutos aumentou de $1,1 \text{ g kg}^{-1}$, na dose de $0,25 \text{ mg L}^{-1}$ para $1,4 \text{ g kg}^{-1}$, na maior dose $10,0 \text{ mg L}^{-1}$, observando-se resposta quadrática positiva, diferentemente da parte aérea, onde não foi encontrado efeito significativo.

Como houve desenvolvimento normal de frutos, parece que a precipitação de P pelo Pb não foi suficiente para bloquear os teores de P em muitos compartimentos da planta, notadamente os frutos. Como não houve um controle sistemático do pH da solução nutritiva durante o crescimento do tomateiro, é razoável supor que tenha havido aumento de acidez da mesma, inibindo a precipitação de ânions $H_2PO_4^-$ combinados com Pb^{2+} .

O teor de Ca nas plantas de tomate (Gráfico 8a), após a aplicação de PB, não foi afetado significativamente em nenhuma das partes analisadas,

contrastando com o estudo de Marschner, Godbold e Jentschke (1995), segundo o qual cátions divalentes como Pb^{+2} competem com outros cátions, como o Ca^{+2} . Baccouch, Chaoui e El-Ferjani (1998) preconizam que a ocorrência de raízes curtas e grossas, bem como alterações na coloração das raízes, podem estar relacionada com a deficiência induzida de Ca pelo Pb. Este fato não foi constatado durante o ciclo vegetativo das plantas de tomateiro.

Quanto ao teor de MG, observa-se, na Gráfico 8b, que nas raízes não houve efeito significativo. Diferente do observado nas raízes, o teor na parte aérea e nos frutos apresentou respostas lineares positivas, aumentando até a dose de $10,0 \text{ mg L}^{-1}$, quando alcançaram os teores de $4,8 \text{ g kg}^{-1}$ e $1,45 \text{ g kg}^{-1}$ de MG, respectivamente. Deduz-se, portanto, que não foi o Pb o indutor da absorção de Mg.

No Gráfico 8c, observa-se que o teor de S na raiz decresceu de forma linear diferente ao observado na parte aérea, em que houve uma resposta quadrática negativa, com o teor de S atingindo o máximo de $6,7 \text{ g kg}^{-1}$ na dose de $5,0 \text{ mg L}^{-1}$ e, a partir daí, ocorrendo diminuição no teor. Nos frutos, não houve efeito significativo das doses de Pb. Essas respostas não condizem com os resultados da pesquisa de Kabata-Pendias e Pendias (2001), pois, de acordo com estes autores, a presença de metais pesados, como o Pb, não exerce qualquer efeito sobre a absorção de S. Já Paiva (2000) observou que o Pb, dentre os metais Zn, Cd e Ni, é o que mais contribuiu para a redução do teor S em mudas de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.).

À exceção do Ca e do S, foi normal a absorção de todos os macronutrientes, mesmo sob o efeito de doses crescentes de Pb. Assim, embora deletério às plantas e aos seres vivos em geral, parece que as plantas de tomateiro não foram prejudicadas pelo Pb nas doses aplicadas, a ponto de influir no fluxo dos macronutrientes a partir da solução nutritiva.

4.1.6 Teor de Cu, Mn, Zn e Fe sob influência de doses diferentes de Pb

Nos Gráficos 9 e 10 encontram-se os dados médios relativos ao teor de micronutrientes das plantas de tomate sob diferentes doses de chumbo.

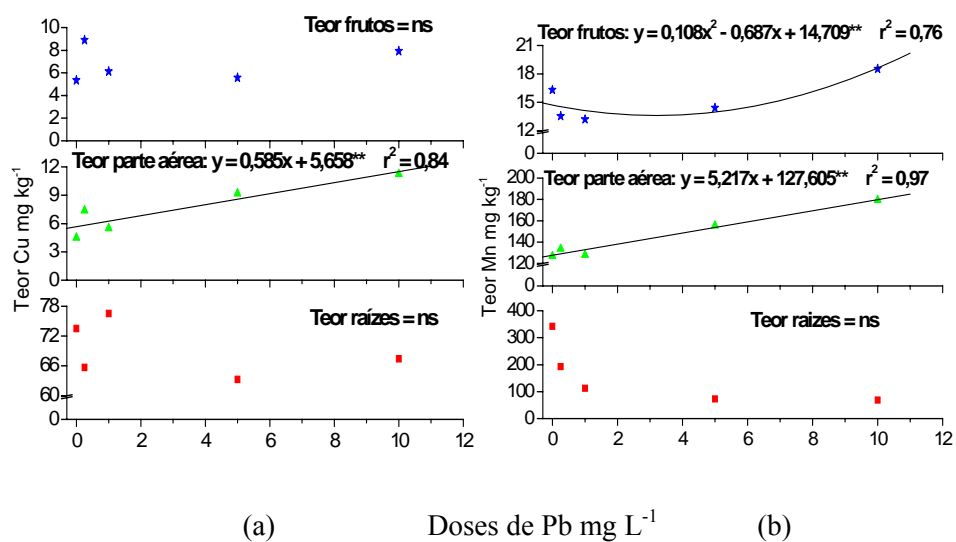


Gráfico 9 Teores de micronutrientes Cu (a) e Mn (b), nos frutos, parte aérea e raízes de plantas de tomate, em função de doses diferentes de chumbo (** significativo a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)

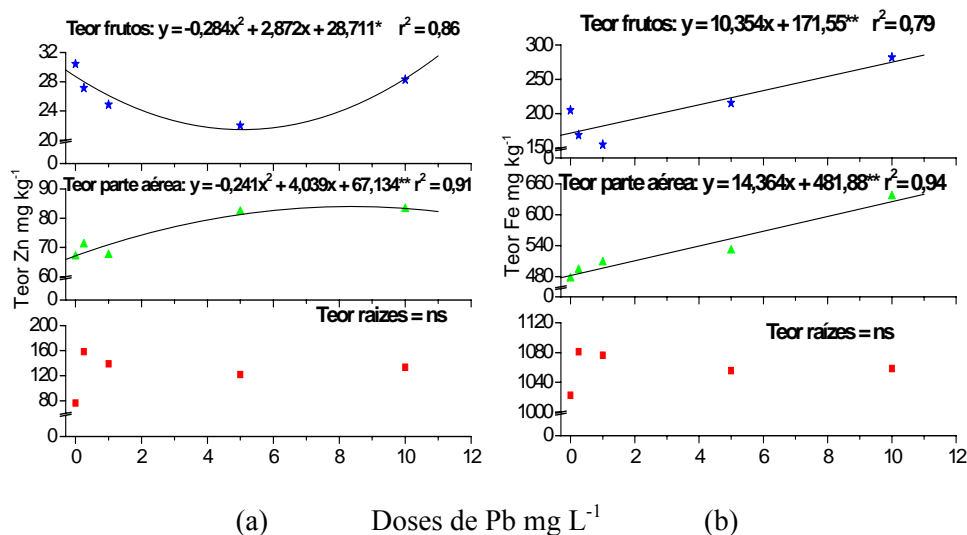


Gráfico 10 Teores de micronutrientes Zn (a) e Fe (b), nos frutos, parte aérea e raízes de plantas de tomate, em função de doses diferentes de chumbo (*e** significativo a 5% e a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)

Na raiz e nos frutos a aplicação de Pb não exerceu efeito estatisticamente significativo sobre o teor de Cu (Gráfico 9a). O Pb é considerado um elemento que não interfere na absorção de Cu. Na parte aérea, a presença de Pb fez com que o teor de Cu aumentasse linearmente, mostrando que este elemento, apesar de não interferir na absorção de Cu (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001), nesse caso, alterou o teor na parte aérea, a exemplo do que ocorre com a aplicação de Cd (OBATA; UMEBAYASHI, 1997) e de Ni (YANG et al., 1996b).

O teor de Mn na parte aérea (Gráfico 9b) apresentou resposta crescente linear, apresentando um teor de 179 mg kg⁻¹ na dose mais alta de Pb aplicada, valor próximo ao encontrado por Paiva (2000), em folhas de ipê-roxo. Nas raízes não houve efeito significativo de Pb sobre o teor de Mn, ao passo que nos frutos

a aplicação de doses crescentes de Pb alcançou teor máximo na dose de 10 mg L⁻¹, sendo esta uma resposta quadrática positiva, indicando haver antagonismo entre Mn e Pb (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001).

No Gráfico 10a observa-se que, nas raízes, o teor de Zn não foi afetado significativamente pelo Pb, resultado também encontrado por Paiva (2000), em raízes de ipê-roxo. Nos frutos tem-se uma resposta quadrática positiva, tendo o ponto mínimo ocorrido na dose de 5 mg L⁻¹. O inverso aconteceu na parte aérea, pois a resposta foi quadrática negativa e seu teor máximo foi próximo à dose de 10 mg L⁻¹. De acordo com Kabata-Pendias e Pendias (1984), metais pesados como o Pb podem ser antagonísticos ao Zn, embora Soares (1999) não tenha observado efeito significativo da aplicação de Pb sobre o teor radicular de Zn em espécies de eucalipto.

O teor de Fe na parte aérea e nos frutos do tomateiro aumentou de forma linear, alcançando teores de 635,8 e 281,8 mg kg⁻¹, respectivamente, na dose de 10,0 mg L⁻¹ (Gráfico 10b). Nas raízes, não houve efeito significativo quanto à aplicação de Pb. Esses resultados conflitam com os obtidos por Kabata-Pendias e Pendias (1984) e Yang et al. (1996b), os quais relataram que, até certa dose de Pb, há restrição na absorção de Fe pela planta, o que não foi observado nesse caso, já que o Pb estimulou a absorção de Fe.

O comportamento apresentado pelos teores de nutrientes nas plantas de tomate cultivadas em ambiente contaminado por Pb reflete bem a dificuldade de identificar espécies tolerantes a metais pesados, pois os teores são distintos nas diferentes partes da planta. Deve-se ainda considerar o fato de que a resposta também parece ser diferenciada entre as espécies.

4.1.7 Índice de translocação (IT) dos macronutrientes sob influência de doses diferentes de Pb

Os efeitos do aumento das doses de Pb sobre os índices de translocação (IT) de P, K, Ca, Mg, S são apresentados nas Gráficos 11 e 12.

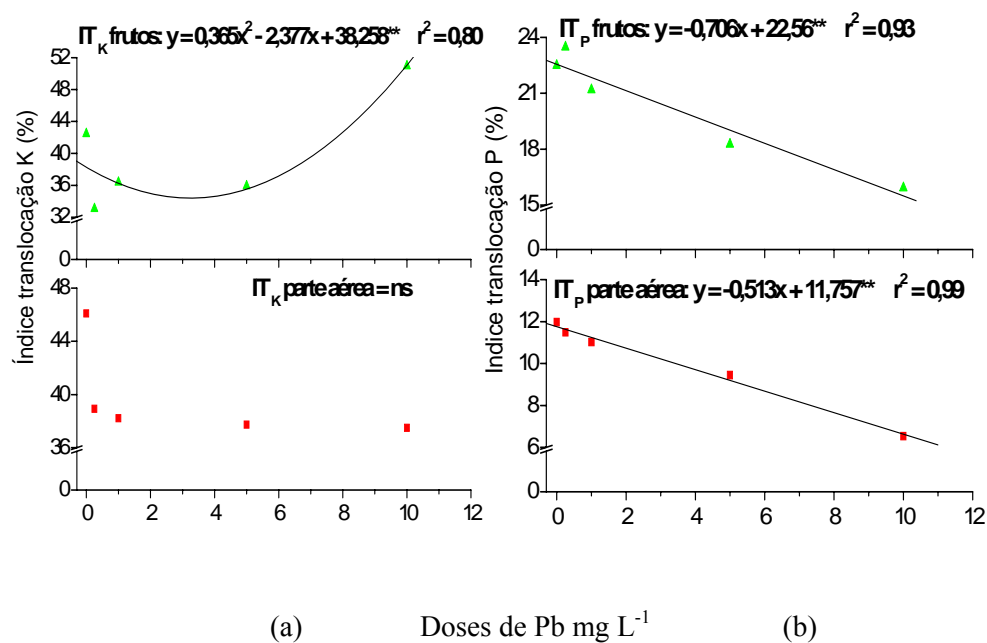


Gráfico 11 Índice de translocação de macronutrientes K (a) e P (b), nos frutos e parte aérea do tomateiro, em função de doses diferentes de chumbo (** significativo a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)

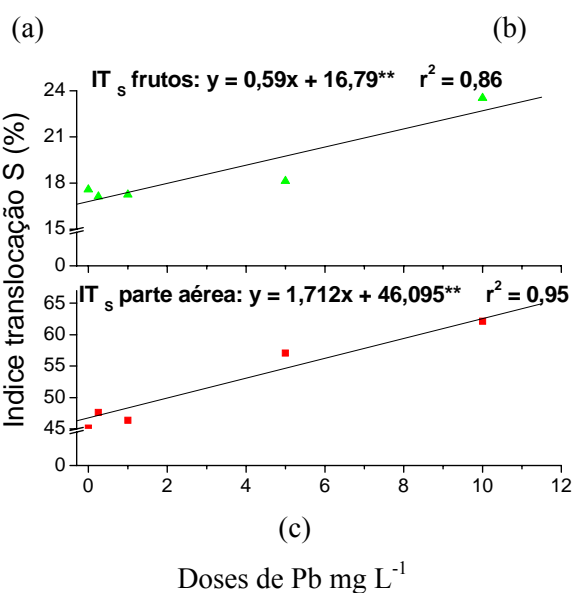
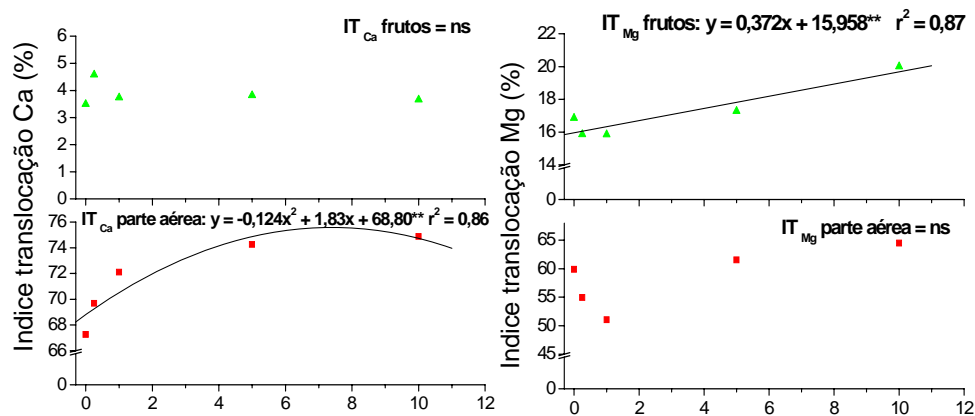


Gráfico 12 Índice de translocação de macronutrientes Ca (a), Mg (b) e S (c), nos frutos e parte aérea do tomateiro, em função de doses diferentes de chumbo (** significativo a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)

A aplicação do metal não promoveu efeito significativo para a translocação de K (Gráfico 11a) na parte aérea. No entanto, observou-se resposta quadrática positiva nos frutos, aumentando o IT de K até a maior dose de Pb ($10,0 \text{ mg L}^{-1}$).

A presença de Pb reduziu linearmente a translocação de P no tomateiro, (Gráfico 11b) tanto nos frutos como na parte aérea. Este fato, como citado anteriormente, é explicado, possivelmente, pela formação de fosfato diácido de chumbo na parede celular da raiz, preconizado por Kabata-Pendias e Pendias (2001).

Observou-se uma resposta quadrática negativa quanto ao IT de Ca na parte aérea do tomateiro (Gráfico 12a), atingindo um máximo de translocação na dose próxima a $10,0 \text{ mg L}^{-1}$. Nos frutos não se observou efeito significativo. O resultado encontrado contrasta com o obtido por Paiva (2000), em que mudas de cedro e ipê-roxo não tiveram o IT afetado pela aplicação de Pb, na parte aérea. Alvarenga (2004) relata que o Ca pode ser absorvido rapidamente, mas é imóvel na planta. O diâmetro iônico e a capacidade de hidratação dos íons influem na mobilidade. Cada íon desenvolve ao seu redor um campo de força proporcional a sua valência, capaz de adsorver uma capa de molécula de água, hidratando-se.

O Mg teve sua translocação aumentada linearmente nos frutos e não apresentou efeito significativo na parte aérea, tendo um teor de $20,0 \text{ g kg}^{-1}$ na dose de 10 mg L^{-1} (Gráfico 12b). O resultado encontrado para o Mg está de acordo com obtido por Paiva (2000), em que o Mg teve sua translocação aumentada linearmente em aplicações de Pb e outros metais estudados.

Conforme se observa na Gráfico (12c), a translocação de S em função da aplicação de Pb apresentou um IT com aumento linear na parte aérea. Nos frutos observou-se resposta quadrática positiva com a translocação de S, aumentando até a aplicação da maior dose de Pb. Yang et al. (1996a, 1996b)

concluíram que a translocação de S diante da aplicação de metais pesados pode ser estimulada em culturas de milho e inibida em repolhos.

À exceção da translocação de P na parte aérea e nos frutos, a translocação de todos os macronutrientes foi normal, mesmo sob doses crescentes de Pb. Portanto, é de se esperar que as concentrações do metal utilizadas não tenham prejudicado as plantas a ponto de influenciar na translocação dos macronutrientes.

4.1.8 Índice de translocação (IT) dos micronutrientes sob influência de doses diferentes de Pb

Os efeitos do aumento das doses de Pb sobre os índices de translocação (IT) de Cu, Mn, Zn e Fe são apresentados nas Gráficos 13 e 14.

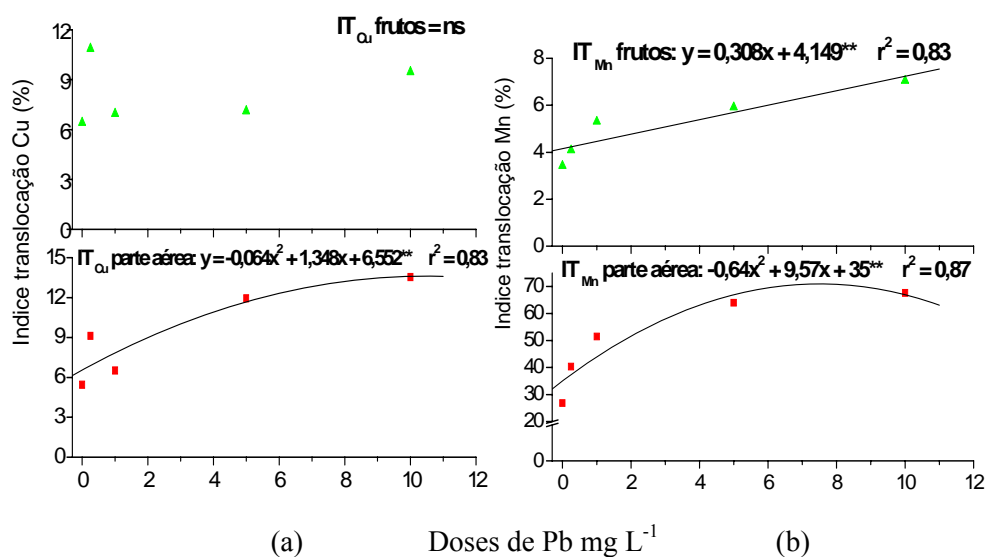


Gráfico 13 Índice de translocação de micronutrientes Cu (a) e Mn (b), nos frutos e parte aérea do tomateiro, em função de doses diferentes de chumbo (** significativo a 1% de probabilidade, ns não significativo pelo teste F)

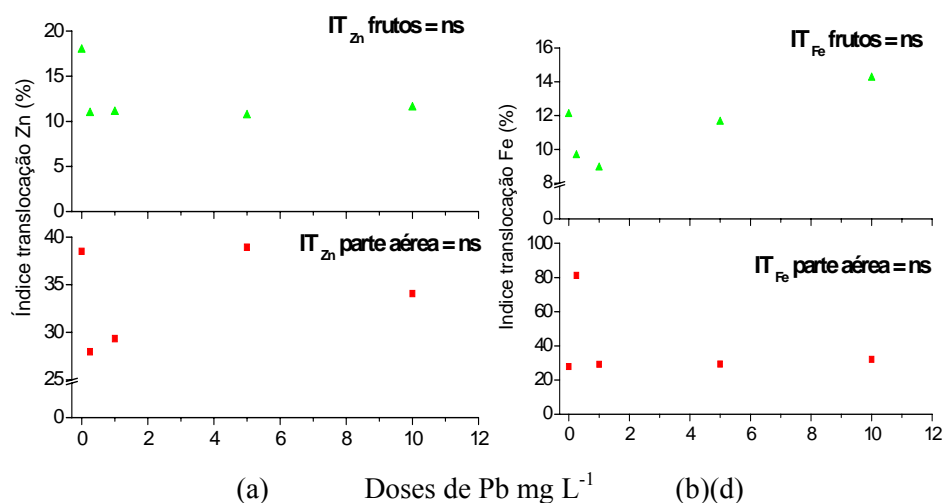


Gráfico 14 Índice de translocação de micronutrientes Zn (a) e Fe (b), nos frutos e parte aérea do tomateiro, em função de doses diferentes de chumbo (ns não significativo pelo teste F)

O índice de translocação do Cu (Gráfico 13a) apresentou resposta quadrática negativa para a parte aérea do tomateiro e uma ausência de efeito significativo para aos frutos. Em mudas de cedro, Paiva (2000) detectou que o Pb não exerce efeito significativo sobre a translocação de Cu, mas, já em mudas de ipê-roxo, observou-se resposta linear negativa.

Para o Mn (Gráfico 13b), pode-se observar um aumento no IT devido à aplicação de Pb, tanto na parte quanto nos frutos. Na parte aérea nota-se resposta quadrática negativa atingindo o máximo na dose de 10 mg L⁻¹ e nos frutos aumento linear. Esses resultados divergem dos encontrados por Soares (1999) que, em mudas de eucalipto, detectou pouca influência de Pb e de outros metais sobre a translocação de Mn.

No Gráfico 14a observa-se que a aplicação de Pb não exerceu efeito significativo sobre o índice de translocação de Zn em nenhuma das partes das plantas de tomate, contrastando com o resultado encontrado (PAIVA, 2000). O autor cita que, na presença de concentrações de Pb, o Zn transloca-se nas plantas em maiores proporções que o normal. Os resultados de Paiva (2000) contrastam com observações de Yang et al. (1996a, 1996b), em que a presença de Pb diminuiu a translocação de Zn.

Tal como visto para o Zn, não foram observados efeitos significativos das doses de Pb na translocação do Fe nas duas partes analisadas das plantas de tomate (Gráfico 14b). O resultado mostra-se de acordo com o de Paiva (2000), que observou que o Pb não afeta o IT de Fe em mudas de cedro.

Sabe-se que, em muitas espécies de plantas, dentre as quais o tomateiro, o chumbo acumula-se preferencialmente nas raízes, tendo baixa translocação para a parte aérea (BHARTI; SINGH, 1993; ELTROP et al., 1991). Este confinamento às raízes, no entanto, provoca distúrbios fisiológicos, impedindo ou dificultando o pleno desenvolvimento das plantas, conforme observado por Paiva et al. (2003).

4.2 Teor e translocação de Cd nos diferentes compartimentos do tomateiro

As equações de regressão ajustadas para os teores e índice de translocação de Cd na raiz, parte aérea e nos frutos do tomateiro, em função das doses aplicadas em solução nutritiva, mostram que esse metal pesado afeta esses parâmetros de forma diferenciada para cada parte da planta.

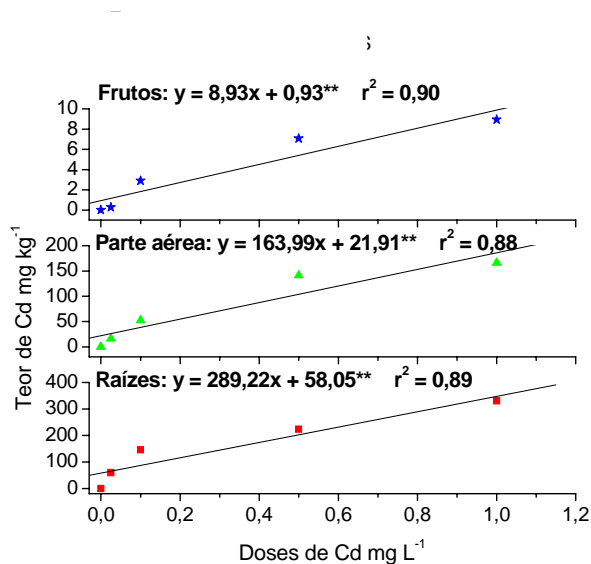


Gráfico 15 Teor de Cd nas raízes, parte aérea e frutos do tomateiro, em função de doses diferentes de cádmio (** significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F)

De acordo com os resultados obtidos, pode-se observar que a aplicação de doses crescentes de Cd induziu ao aumento do teor desse elemento nas raízes, na parte aérea e nos frutos do tomateiro e em todas as partes foram obtidos respostas quadráticas negativas. A absorção foi diretamente proporcional à quantidade de metal oferecida à planta, ou seja, quanto maior a concentração de metal, maior a absorção nas partes estudadas (Gráfico 15).

Houve, por outro lado, uma nítida diferença entre os teores absorvidos. Nas doses de 0, 0,025, 0,1, 0,5, 1,0 mg L⁻¹ foram observados teores de, respectivamente, 0; 59,42; 145,93; 224,05; 330,83 mg kg⁻¹, para o sistema radicular, 0; 16,38; 52,45; 141,08; 166,15 mg kg⁻¹, para a parte aérea e 0; 0,275; 2,9; 7,08; 8,95 mg kg⁻¹, para os frutos (Gráfico 15). Por meio destes dados pode-se deduzir que o metal se transloca muito pouco na planta, dada a diferença

expressiva de contaminante encontrada nas três partes da planta, com maior concentração nas raízes.

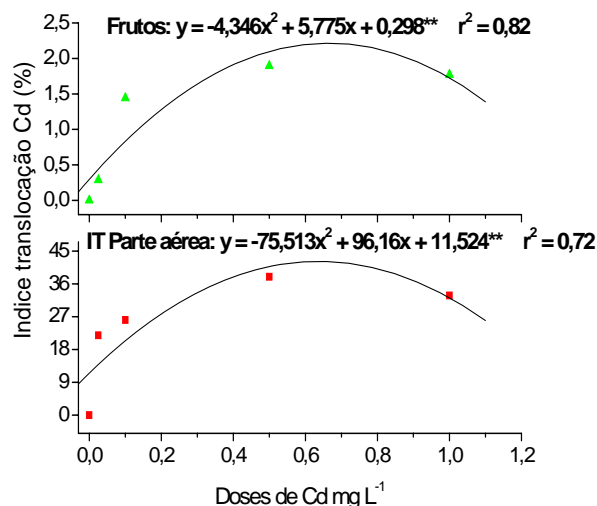


Gráfico 16 Índice de translocação de Cd na parte aérea e frutos do tomateiro, em função de doses diferentes de cádmio (** significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F)

Por meio do índice de translocação (IT) pode ser observada a quantidade de metal que se translocou das raízes para a parte aérea e das raízes para os frutos. Na parte aérea, a dose que mais translocou cádmio foi 0,5mg L⁻¹, com 37,89%, seguida pelas doses de 1,0; 0,1; 0,025 mg L⁻¹, com 32,82%, 26,09% e 21,89% de translocação, respectivamente (Gráfico 16).

O maior IT para os frutos, novamente, foi para a dose de 0,5 mg L⁻¹, com 1,89%, seguida pelas doses de 1,0; 0,1; 0,025 mg L⁻¹, com as respectivas porcentagens de 1,77%, 1,44% e 0,29%. Isso significa que as plantas de tomate restringem a translocação de Cd para a parte aérea e frutos até certo limite, quando, então, passam a translocá-los com maior intensidade, até que, possivelmente, alcance um patamar de saturação e haja novamente uma restrição na translocação do metal.

A toxidez do Cd em plantas e organismos vivos em geral relaciona-se à facilidade de combinação do elemento com grupos químicos das enzimas envolvidas no metabolismo. A facilidade de combinação do Cd^{2+} com doadores de elétrons de aminoácidos livres, enzimas e proteínas foi estudada por Silva et al. (2007a, 2007b), em pesquisa de síntese e caracterização de quelatos de Cd, Cu, Zn e Pb com ácido dietilenotriaminopentacético, ou DTPA, um aminoácido sintético. Os trabalhos parecem confirmar não apenas a forma de intoxicação das plantas estudadas pelo Cd^{2+} mas também a eficácia da desintoxicação de organismos vivos em geral pelo ácido etilenodiaminotetracético, ou EDTA, uma estrutura semelhante ao DTPA, citada por Baird (2002).

A redistribuição de cádmio na planta está associada com fitoquelatinas (GUO; MARSCHNER, 2001). O complexo Cd-fitoquelatinas pode representar uma forma móvel para o transporte de cádmio das raízes para as partes aéreas. A fitoquelatina é uma estrutura complexa, formando peptídeos ricos em cisteína, ou seja, ricos em aminoácidos, que são doadores de elétrons, condição necessária à formação de complexos com metais de transição (ácidos de Lewis) como é o caso do Cd (MALAVOLTA, 2006).

4.3 Teor e translocação de Pb nos diferentes compartimentos do tomateiro

As equações de regressão ajustadas para os teores e o índice de translocação de Pb nas raízes, na parte aérea e nos frutos do tomateiro, em função das doses aplicadas em solução nutritiva, mostram que esse metal pesado afeta esses parâmetros de forma diferenciada para cada parte da planta.

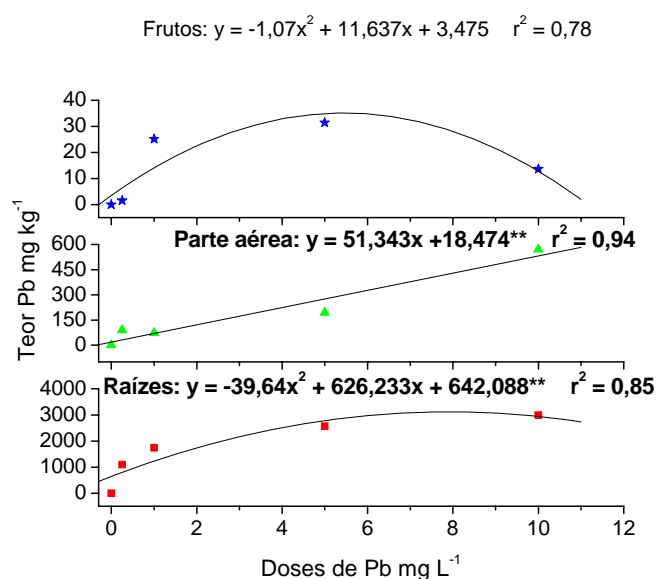


Gráfico 17 Teor de Pb nas raízes, parte aérea e frutos do tomateiro, em função de doses diferentes de chumbo (** significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F)

Pode-se observar (Gráfico 17) que a aplicação de doses crescentes de Pb induziu ao aumento linear do teor desse elemento na parte aérea do tomateiro, enquanto nas raízes e frutos foram obtidas respostas quadráticas negativas. A absorção do metal pelas plantas de tomate foi, mais uma vez, proporcional à dose de metal oferecida às mesmas quando se refere às raízes e à parte aérea. Para os frutos, houve uma redução no teor de Pb na dose de 10,0 mg L⁻¹ quando comparado com as doses de 1 e 5 mg L⁻¹.

Houve, como observado para o Cd, grande diferença de absorção nas partes estudadas. Nas doses de 0, 0,25, 1, 5 e 10 mg L⁻¹, observou-se uma absorção de, respectivamente, 0; 1096,52; 1734,08; 2571,05; 2988,08 mg kg⁻¹,

para o sistema radicular, 0; 89,55; 72,4; 193,93; 570,83 mg kg⁻¹, para a parte aérea e 0; 1,48; 25,1; 31,4; 13,6 mg kg⁻¹, para os frutos (Gráfico 17). Conforme o cádmio, o chumbo também se transloca pouco nas plantas, dada a diferença expressiva do contaminante encontrada nos três compartimentos das mesmas.

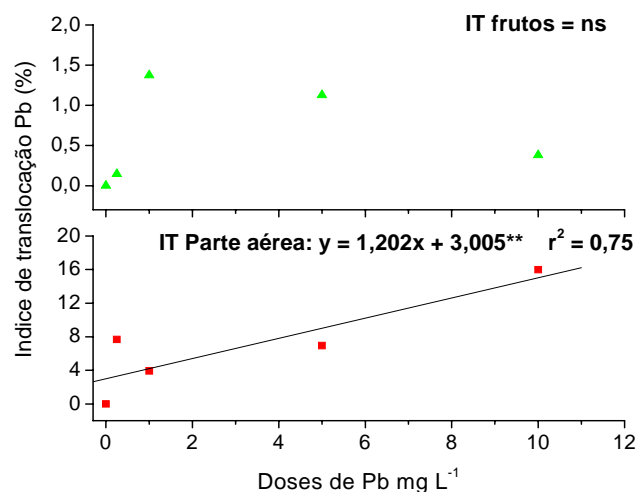


Gráfico 18 Índice de translocação de Pb na parte aérea e nos frutos do tomateiro, em função de doses diferentes de chumbo (**significativo, a 1% de probabilidade e ns, não significativo, pelo teste F)

No Gráfico 18 nota-se a dificuldade de mobilização do chumbo nas plantas, pelo índice de translocação muito baixo. A dose de 10 mg L⁻¹, quando observada a parte aérea, foi a mais eficiente, com 15,97% de translocação. Ao contrário, quando comparado este índice pelos frutos, apesar de não se verificar efeito significativo, observou-se apenas 0,38% de translocação.

Malavolta (1994) cita que os efeitos tóxicos do Pb, tais como prejuízos à fotossíntese, mitose e absorção de água e sintomas físicos como folhas verdes e escuras, murchamento das folhas mais velhas e parte aérea e raízes pouco desenvolvidas e pardas, podem ser observados em plantas, mas não são

totalmente específicos. No presente trabalho, observaram-se diversos sintomas semelhantes em plantas sob as doses de 5 e 10 mg L⁻¹ de Pb.

O Pb interfere na síntese de clorofila aliada a um reduzido transporte de Fe, necessário à formação dos grupos heme. Nas folhas aparece, então, um sintoma de deficiência (clorose), provocando danos em plantas estressadas (FODOR et al., 1998).

Carvalho et al. (2008) também quantificaram o teor extraído de chumbo em feijoeiro cultivado em dois Latossolos. Para a dose de 250 mg dm⁻³, o teor de Pb na parte aérea correspondeu a 20,7% da dose aplicada para o Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e 26,5% para o Latossolo Vermelho-Amarelo húmico (LVAh). Sob a dose de 500 mg dm⁻³, no solo LVd, observou-se uma extração pela planta de 19,3% e, para o LVAh, 18%. Esses dados em solos confirmam a baixa translocação do metal, mesmo considerando doses bem maiores em solos que em solução nutritiva, pois se considera, na solução nutritiva, que o metal encontra-se prontamente disponível para absorção pelas raízes.

Carvalho et al. (2008) confirmaram a baixa translocação de Pb e Cd, notadamente do Pb, mostrando que, dependendo da dose presente no solo, desde que insuficiente para eliminar as plantas, e se elas forem capazes de produzir sementes, podem ser consumidas na alimentação sem riscos à saúde, devido aos teores insignificantes do metal nos frutos (grãos e vagem). Os mesmos autores atribuíram também ao impedimento estérico dos quelatos de Pb com aminoácidos ou substâncias afins da raiz a baixa translocação.

Essas informações convergem para os trabalhos de Silva et al. (2007a, 2007b), de síntese e caracterização de quelatos de Pb, Cd, Zn e Cu com DTPA. Ambos, segundo os autores, são estruturas de elevado impedimento estérico, notadamente o quelato de Pb. Isso parece justificar a dificuldade de ascensão do metal na planta, já que permanece, em grande parte, quelatizado a aminoácidos

livres, proteínas ou secreções diversas das raízes, ambos ricos em grupamentos doadores de elétrons, como o DTPA.

A semelhança de comportamento químico de Pb e Cd em plantas, aliás, a mesma entre Cu e Zn, foi constatada também por Paim et al. (2006) em solo contaminado com resíduos de mineração de Zn. Após a extração de Zn do minério carbonato de zinco, seus dejetos, ricos em Pb, Cd e Zn, provocam sérios problemas ao solo.

Comparando-se os dados dos Gráficos 16 e 18, observa-se diferença na translocação de Cd e Pb no tomateiro. Nas plantas cultivadas com Pb o IT, principalmente das folhas, foi significativamente menor que aquelas cultivadas com Cd. Um argumento válido para explicar o fato refere-se a propriedades periódicas dos dois metais, principalmente o raio atômico (0,97 e 1,32 Å para Cd e Pb, respectivamente) e a densidade (8,6 g cm⁻³ para Cd e 11,3 g cm⁻³ para Pb), fatores que dificultam a mobilidade e, portanto, a atividade do Pb, muito mais que a do Cd.

Outra teoria sobre mobilidade refere-se à eletronegatividade. Assim, o Cd (1,7eV) seria mais móvel que o Pb (2,3 eV) (ANTONIADIS; MCKINLEY; ZUHAIRI, 2007; OLIVEIRA et al., 2009).

4.4 Influência das doses de Cd na produção de matéria seca do tomateiro

Na Tabela 3 encontram-se os dados médios relativos aos resultados do crescimento das plantas de tomate sob diferentes doses de cádmio.

Tabela 3 Média dos valores de matéria seca (MS) das partes da planta em função da aplicação de Cd

Doses Cd mg L ⁻¹	Peso de matéria seca (g)		
	Raízes (MSR)	Parte aérea (MSPA)	Frutos (MSF)
Controle	1,201	16,560	14,460
0,025	1,482	17,332	16,538
0,1	1,986	18,705	17,308
0,5	2,012	14,898	15,790
1,0	2,355	16,143	14,068

Para a MSR houve crescimento das raízes de tomate em todas as concentrações de Cd, chegando à produção máxima de 2,355 g na dose de 1,0 mg L⁻¹. Observa-se, também na Tabela 3, que há um comportamento diferente entre o crescimento das doses de Cd na solução nutritiva e a produção de parte aérea e frutos. Na parte aérea (MSPA) e frutos (MSF), houve um aumento na produção até a concentração 0,1 mg L⁻¹, chegando a 18,705 g e 17,308 g, respectivamente. A partir daí tiveram sua produção reduzida até valores próximos aos encontrados no tratamento controle.

Percebe-se que, até a dose 0,5 mg L⁻¹, embora tenha havido redução de MSPA na referida concentração, a intensidade do fenômeno foi suficiente para aumentar MSF, objetivo maior do cultivo de tomate em solução nutritiva ou em solos. Houve, ao contrário do esperado, “um benefício” para a produção de frutos.

É possível que tenha havido um efeito antagônico (competitivo) entre o Cd e alguns elementos essenciais, devido aos aumentos na produção de frutos nas doses de 0,025, 0,1 e 0,5 mg L⁻¹. Segundo Faquin (2005), ocorre uma competição (ou efeito antagônico) entre cátions divalentes e o cádmio, quanto à

absorção pelas plantas. Considerando como muito baixas as concentrações de Cd utilizadas, é razoável supor, dentre os efeitos antagônicos possíveis, o estímulo do Cd a uma maior absorção de cátions divalentes, essenciais ao crescimento das plantas, nas doses testadas.

4.5 Influência das doses de Pb na produção de matéria seca do tomateiro

Na Tabela 4 encontram-se os dados médios relativos aos resultados do crescimento das plantas de tomate sob diferentes doses de chumbo.

Tabela 4 Média dos valores de matéria seca (MS) das partes da planta em função da aplicação de Pb

Doses Pb mg L ⁻¹	Peso de matéria seca (g)		
	Raízes (MSR)	Parte aérea (MSPA)	Frutos (MSF)
Controle	1,201	16,560	14,460
0,25	2,231	20,793	16,310
1,0	2,396	17,298	15,905
5,0	2,338	15,795	12,653
10,0	1,379	10,985	5,828

Conforme demonstram os dados da Tabela 4, as doses de Pb aplicadas promoveram maiores crescimentos nas partes da planta nas concentrações de 0,25 e 1,0 mg L⁻¹, chegando a 2,396 g, 17,298 g e 15,905 g para raízes, parte aérea e frutos, respectivamente. Nas concentrações de 5 e 10 mg L⁻¹, as plantas tiveram sua produção reduzida, principalmente na maior dose em que a MSPA e MSF foi significativamente afetada, atingindo a produção de 10,985 g e 5,828 g, respectivamente.

O Pb absorvido se acumula nas paredes celulares, notadamente das raízes, o que parece contribuir para diminuir seu efeito tóxico para a planta e seu transporte para os frutos (FAQUIN, 2005). Esse fato, aparentemente, explica o “efeito benéfico” de algumas doses de Pb para as plantas, conforme os dados desta pesquisa.

De acordo com Kabata-Pendias e Pendias (2001), o mecanismo de exclusão do Pb é realmente a deposição radicular. O fenômeno ocorre por ligação do metal a polímeros orgânicos insolúveis, alguns dos quais contendo fosfatos como doadores de elétrons, formando precipitados amorfos.

A dose de 10 mg L^{-1} foi a que mais influenciou negativamente o desenvolvimento das plantas, provocando uma queda de produção, principalmente para MSF.

5 CONCLUSÃO

Doses de Cd inferiores a 1 mg L^{-1} e de Pb inferiores a 5 mg L^{-1} não prejudicaram o desenvolvimento das plantas. Estes foram os limites de tolerância do tomateiro a Cd e Pb.

A translocação de S, K, Mg, Cu, Mn, Zn e Fe não sofreu prejuízos na presença de Pb.

Qualquer dose de Pb reduziu a translocação de P.

O Cd não prejudicou a translocação de K, Ca, Mg, Zn.

Cu e P tiveram a mobilidade reduzida na parte aérea do tomateiro sob as doses de Cd.

Pb e Cd translocam-se muito pouco nas plantas, concentrando-se nas raízes. Baixa translocação de Cd e Pb e aumento da produção de frutos pelo tomateiro não permitem apontar para o consumo dos frutos porque há controvérsias quanto à tolerabilidade dos organismos aos referidos metais.

REFERÊNCIAS

ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, n. 1, p. 21-26, jan./fev. 1998.

AGUIAR, M. R.; NOVAES, A. C.; GUARINO, A. W. S. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, n. 6B, p. 1145-1154, nov./dez. 2002.

ALBERONI, R. B. **Hidroponia**: como instalar e manejar o plantio de hortaliças dispensando o uso do solo, alface, rabanete, rúcula, almeirão, chicória, agrião. São Paulo: Nobel, 1998. 102 p.

ALLOWAY, B. J. Cadmium. In: _____. **Heavy metals in soils**. New York: J. Wiley, 1990. p. 100-121.

_____. **Heavy metals in soils**. New York: J. Wiley, 1995. 388 p.

ALVARENGA, M. A. R. **Tomate**: produção em campo, em casa-de-vegetação e em hidroponia. Lavras: UFLA, 2004. 400 p.

ANTONIADIS, V.; MCKINLEY, J. D.; ZUHAIRI, Y. W. Single-element and competitive mobility measured with column infiltration and batch tests. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 36, n. 1, p. 53-60, Jan./Feb. 2007.

BACCOUCH, S.; CHAOUI, A.; EL-FERJANI, E. Nickel toxicity: effects on growth and metabolism of maize. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 21, n. 3, p. 577-588, Mar. 1998.

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

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; ELRASHIDI, M. A. Toxicology and nutrient constraints on root growth. **Hortscience**, Alexandria, v. 33, n. 6, p. 960-965, Oct. 1998.

BARCELÓ, J.; VASQUES, M.; POSCHENRIEDER, C. Structural and ultrastructural disorders in cadmium treated bush bean plants (*phaseolus vulgaris* L.). **New Phytologist**, Cambridge, v. 108, n. 1, p. 37-49, Apr. 1988.

BELL, P. F.; JAMES, B. R.; CHANEY, R. L. Heavy-metal extractability in long-term sewage sludge and metal salt-amended soils. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 20, n. 2, p. 481-486, Apr./June 1991.

BENAVIDES, M.; GALLEGOS, S.; TOMARO, M. Cadmium toxicity in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 17, n. 1, p. 21-24, 2005. Special Issue.

BERGMANN, W. **Nutritional disorders of plants: development, visual and analytical diagnosis**. New York: G. Fischer, 1992. 741 p.

BHARTI, N.; SINGH, R. P. Growth and nitrate reduction by *Sesamum indicum* cv. PB-1 responds differentially to lead. **Phytochemistry**, Oxford, v. 33, n. 3, p. 531-534, 1993.

BRUNE, A.; URBACH, W.; DIETZ, K. J. Differential toxicity of heavy metals is partly related to a loss of preferential extraplasmic compartmentation: a comparison of C-, Mo-, Ni- and Zn-stress. **New Phytologist**, New York, v. 129, n. 3, p. 403-409, Mar. 1995.

CAMPOS, M. L. et al. Determinação de cádmio, cobre, cromo, níquel, chumbo e zinco em fosfatos de rocha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 4, p. 361-367, abr. 2005.

CARVALHO, A. V. S. **Produção de matéria seca e de grãos por plantas de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas em solos tratados com metais pesados**. 2006. 87 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica e Agrobioquímica) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

CARVALHO, A. V. S. et al. Produção de matéria seca e de grãos por plantas de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas em solos tratados com metais pesados. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 5, p. 949-955, set./out. 2008.

CASTELLANE, P. D.; ARAÚJO, J. A. C. **Cultivo sem solo: hidroponia**. 2. ed. Jaboticabal: FUNESP, 1995. 43 p.

CASTRO, A. C. R. **Deficiência de macronutrientes em helicônia 'Golden Torch'**. Recife: UFRPE, 2007. 102 p.

CHAVES, A. M.; MELO, W. F. **A cultura do tomate**. Brasília: CONAB, 2006. 9 p.

CLARK, J. Characterization of phosphatase of intact maize roots. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 23, p. 458-460, 1975.

COOKER, E. G.; MATTHEUS, P. J. Metals in sewage sludge and their potential effects in agriculture. **Water Science and Technology**, Oxford, v. 15, n. 1, p. 209-225, Feb. 1983.

COSTA, E. D. **Adsorção e competição de alguns metais por ácidos húmicos extraídos de latossolo húmico da Região Araponga, Minas Gerais**. 1991. 71 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1991.

ELTROP, L. et al. Lead tolerance of *Betula* and *Salix* in the mining area of Mechernich. **Plant and Soil**, The Hague, v. 131, n. 2, p. 275-285, 1991.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: ESAL, 1994. 227 p.

_____. _____. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 182 p.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa, MG: UFV, 2007. 234 p.

FODOR, F. et al. Lead uptake, distribution, and remobilization in cucumber. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 21, n. 7, p. 1363-1373, July 1998.

FURLANI, P. R. et al. **Cultivo hidropônico de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1999. 52 p.

GONÇALVES JÚNIOR, A. C.; LUCHESE, E. B.; LENZI, E. Avaliação da fitodisponibilidade de cádmio, chumbo e crômio, em soja cultivada em Latossolo vermelho escuro tratado com fertilizantes comerciais. **Química Nova**, São Paulo, v. 23, n. 2, p. 173-177, mar./abr. 2000.

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

GUSSARSON, M. Cadmium-induced alterations in nutrient composition and growth of *Betula pendula* seedlings: the significance of fine roots as a primary target for cadmium toxicity. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, v. 17, n. 12, p. 2151-2163, Dec. 1994.

GUSSARSON, M. et al. Enhancement of cadmium effects on growth and nutrient composition of birch (*Betula pendula*) by buthionine sulphoximine (BSO). **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 47, n. 295, p. 211-215, 1996.

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

HENRIQUES, A. R. **Desenvolvimento de plantas e qualidade fisiológica de sementes de arroz (*Oryza sativa* L.) submetidas a diversas concentrações de cádmio**. 2008. 101 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2008.

HORN, D. et al. Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 1, p. 77-85, jan./fev. 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil**. Rio de Janeiro, 2010. 80 p.

JALIL, A.; SELLES, F.; CLARKE, J. M. Effect of cadmium on growth and the uptake of cadmium and other elements by durum wheat. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, v. 17, n. 11, p. 1839-1858, Nov. 1994.

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

_____. _____. Boca Raton: CRC, 2001. 331 p.

KOS, B.; LESTAN, D. Induced phytoextraction/soil washing of lead using biodegradable chelate and permeable barriers. **Environmental Science and Technology**, Easton, v. 37, n. 3, p. 624-629, Jan. 2003.

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

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

MALAVOLTA, E.; VITTI, C. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. 2. ed. Piracicaba: ESALQ-USP, 1997. 319 p.

MARSCHNER, P.; GODBOLD, D. L.; JENTSCHKE, G. Dynamics of lead accumulation in mycorrhizal and nonmycorrhizal Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). **Plant and Soil**, The Hague, v. 178, n. 2, p. 239-245, 1995.

MARSOLA, T.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. Acumulação de cobre e zinco em tecidos do feijoeiro em relação com o extraído do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 92-98, 2005.

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**, Monticello, v. 21, n. 11, p. 2369-2379, Nov. 1998.

OBATA, H.; UMEBAYASHI, M. Effects of cadmium on mineral nutrient concentrations in plants differing tolerance to cadmium. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, v. 20, n. 1, p. 97-105, Jan. 1997.

OGA, S. **Fundamentos de toxicologia**. São Paulo: Atheneu, 1996. 515 p.

OLIVEIRA, J. A. de. Absorção e acúmulo de cádmio e seus efeitos sobre o crescimento relativo de plantas de Aguapé e de Salvinia. **Revista de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v. 13, n. 3, p. 329-341, 2001.

OLIVEIRA, R. C. et al. Movimento de zinco em colunas de solo tratados com resíduo de calcário oriundo de mineração. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 56, n. 5, p. 679-684, set. 2009.

PAIM, L. A. et al. Estudo dos efeitos do silício e do fósforo na redução da disponibilidade de metais pesados em área de mineração. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 28-33, jan./fev. 2006.

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

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

_____. Índice de translocação de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) submetidas a doses crescentes de cádmio, níquel e chumbo. **Sociedade de Investigações Florestais**, Viçosa, MG, v. 26, n. 4, p. 467-473, 2002.

PAIVA, H. N. et al. Influência de doses crescentes de chumbo sobre o teor e o conteúdo de nutrientes e Pb em mudas de Ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.). **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 151-158, mar./abr. 2003.

PAOLIELLO, M. B.; CHASIN, A. M. **Ecotoxicologia do chumbo e seus compostos**. Salvador: NEAMA, 2001. 144 p. (Série Cadernos de Referência Ambiental, 3).

PARMIGIANE, M. P. C. V. D.; MIDIO, A. F. Chumbo na alimentação da população infantil. **Cadernos de Nutrição**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 25-34, abr. 1995.

QU, R. L. et al. Lead uptake by roots of four turfgrass species in hydroponic cultures. **Hortscience**, Alexandria, v. 38, n. 4, p. 623-626, July 2003.

SANTOS, E. I. A. **Avaliação do grau de contaminação da alface por metais pesados no município de Gurupi, TO**. 2009. 76 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal de Tocantins, Gurupi, 2009.

SILVA, A. et al. Dietary intake and health effects of selected toxic elements. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 17, p. 79-93, 2005. Special Issue.

SILVA, V. L. et al. Spectrometric and theoretical investigation of the structures of Cu and Pb/DTPA complexes. **Structural Chemistry**, Deerfield Beach, v. 18, n. 5, p. 605-609, Oct. 2007a.

_____. Structural determination of Zn and Cd-DTPA complexes: MS, infrared, ¹³C NMR and theoretical investigation. **Spectrochimica Acta**, London, v. 68, n. 5, p. 1197-1200, Jan. 2007b.

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

STEVENSON, F. J.; FITCH, A. Chemistry of complexation of metal ions with soil solution organics. In: HUANG, P. M. et al. (Ed.). **Interaction of soil minerals with natural organics and microbes**. Madison: Soil Science Society America, 1986. p. 29-58.

TAN, K. H. **Environmental soil science**. New York: M. Dekker, 2000. 452 p.

WALKER, W. M.; MILLER, J. E.; HASSETT, J. J. Effect of lead and cadmium upon the calcium, magnesium, potassium, and phosphorus concentration in young corn plants. **Soil Science**, Baltimore, v. 124, n. 3, p. 145-151, 1977.

WALLACE, A. et al. Some interactions in plants among cadmium, other heavy metals, and chelating agents. **Agronomy Journal**, Madison, v. 69, n. 1, p. 18-20, 1977.

YANG, X. et al. Cadmium effects on influx and transport of mineral nutrients in plant species. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, v. 19, n. 3/4, p. 643-656, 1996a.

_____. Plant tolerance to nickel toxicity: II., nickel effects on influx and transport of mineral nutrients in four plant species. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, v. 19, n. 2, p. 265-279, 1996b.

YARON, B.; CALVET, R.; PROST, R. **Soil pollution process and dynamics**. Berlin: Springer Verlag, 1996. 315 p.

ANEXOS

ANEXO A

Tabela 1A Resumo da análise de variância para os teores de macronutrientes das raízes do tomateiro sob doses de cádmio

Causa da variação	GL	Quadrado médio				
		Teor g kg ⁻¹				
		K	P	Ca	Mg	S
Doses	4	46,1637 ^{ns}	0,9817 ^{ns}	1,9007 ^{ns}	0,7792 ^{ns}	0,522 ^{**}
Resíduo	15	15,6263	0,4148	1,3055	0,3995	0,1746
Média geral		9,95	3,745	9,065	1,905	4,160
Cv(%)		39,73	17,20	12,60	33,18	10,05

ns não significativo, pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 2A Resumo da análise de variância para os teores de macronutrientes da parte aérea do tomateiro sob doses de cádmio

Causa da variação	GL	Quadrado médio				
		Teor g kg ⁻¹				
		K	P	Ca	Mg	S
Doses	4	7,2067*	0,0145 ^{ns}	4,8942*	0,0787 ^{ns}	1,2445 ^{**}
Resíduo	15	3,9923	0,0107	3,1776	0,0623	0,5313
Média geral		25,12	0,590	22,57	3,650	4,740
Cv(%)		7,95	17,51	7,90	6,84	15,38

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 3A Resumo da análise de variância para os teores de macronutrientes dos frutos do tomateiro sob doses de cádmio

Causa da variação	GL	Quadrado médio				
		Teor g kg ⁻¹				
		K	P	Ca	Mg	S
Doses	4	4,2082*	0,0107 ^{ns}	0,0745 ^{ns}	0,0130 ^{ns}	0,0137 ^{ns}
Resíduo	15	2,7861	0,0095	0,0538	0,0078	0,0063
Média geral		22,36	1,165	1,035	0,9950	1,750
Cv(%)		7,46	8,37	22,42	8,90	4,55

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 4A Resumo da análise de variância para os teores de micronutrientes das raízes do tomateiro sob doses de cádmio

Causa da variação	GL	Quadrado médio			
		Teor mg kg ⁻¹			
		Cu	Mn	Zn	Fe
Doses	4	1584,0**	53351**	1482,7 ^{ns}	1346,7**
Resíduo	15	99,319	4874,9	475,01	238,47
Média geral		83,865	186,46	95,4	1039,4
Cv(%)		11,88	37,44	22,85	1,49

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 5A Resumo da análise de variância para os teores de micronutrientes da parte aérea do tomateiro sob doses de cádmio

Causa da variação	GL	Quadrado médio			
		Teor mg kg ⁻¹			
		Cu	Mn	Zn	Fe
Doses	4	2,6032**	289,33*	139,84**	5579,2*
Resíduo	15	0,7916	267,68	61,437	5726,9
Média geral		4,440	13,58	61,305	493,07
Cv(%)		20,04	120,49	12,79	15,35

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 6A Resumo da análise de variância para os teores de micronutrientes dos frutos do tomateiro sob doses de cádmio

Causa da variação	GL	Quadrado médio			
		Teor mg kg ⁻¹			
		Cu	Mn	Zn	Fe
Doses	4	3,9695*	9,593 ^{ns}	31,770 ^{ns}	2241,8 ^{ns}
Resíduo	15	4,2325	2,6745	38,624	309,15
Média geral		6,685	13,905	26,965	166,76
Cv(%)		30,77	11,76	23,05	10,54

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 7A Resumo da análise de variância para o índice de translocação (IT) de macronutrientes da parte aérea do tomateiro sob doses de cádmio

Causa da variação	GL	Quadrado médio				
		IT parte aérea				
		K	P	Ca	Mg	S
Doses	4	26,305 ^{ns}	4,8961*	9,1296 ^{ns}	47,553 ^{ns}	37,0005*
Resíduo	15	14,823	2,2496	5,8956	21,584	22,177
Média geral		43,961	10,765	69,027	56,256	44,314
Cv(%)		8,76	13,93	3,52	8,26	10,63

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 8A Resumo da análise de variância para o índice de translocação (IT) de macronutrientes dos frutos do tomateiro sob doses de cádmio

Causa da variação	GL	Quadrado médio				
		IT frutos				
		K	P	Ca	Mg	S
Doses	4	24,996 ^{ns}	4,8961 ^{ns}	0,3263 ^{ns}	5,706 ^{ns}	2,3971 ^{ns}
Resíduo	15	11,461	2,2497	0,4179	3,331	1,069
Média geral		39,188	10,765	3,1603	15,357	16,406
Cv(%)		8,64	13,93	20,46	11,88	6,30

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 9A Resumo da análise de variância para o índice de translocação (IT) de micronutrientes da parte aérea do tomateiro sob doses de cádmio

Causa da variação	GL	Quadrado médio			
		IT parte aérea			
		Cu	Mn	Zn	Fe
Doses	4	8,1236**	833,76**	77,803 ^{ns}	10,338*
Resíduo	15	1,4910	51,357	11,763	10,886
Média geral		4,9440	42,714	33,819	28,90
Cv(%)		24,70	16,78	10,14	11,42

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 10A Resumo da análise de variância para o índice de translocação (IT) de micronutrientes dos frutos do tomateiro sob doses de cádmio

Causa da variação	GL	Quadrado médio			
		IT frutos			
		Cu	Mn	Zn	Fe
Doses	4	4,1419 ^{ns}	8,1656**	15,816 ^{ns}	7,5194 ^{ns}
Resíduo	15	3,6122	1,1454	13,872	1,8058
Média geral		7,1319	4,882	14,948	9,846
Cv(%)		26,65	21,92	24,92	13,65

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 11A Resumo da análise de variância para o teor de cádmio nas raízes, parte aérea e frutos do tomateiro

Causa da variação	GL	Quadrado médio		
		Teor mg kg ⁻¹		
		Raízes	Parte aérea	Frutos
Doses	4	68880,6**	22244,4**	64,915**
Resíduo	15	257,49	142,357	0,396
Média geral		152,045	75,210	4,042
Cv(%)		10,55	15,86	15,57

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 12A Resumo da análise de variância para o índice de translocação de cádmio na parte aérea e frutos do tomateiro

Causa da variação	GL	Quadrado médio	
		IT	
		Parte aérea	Frutos
Doses	4	855,190**	3,066**
Resíduo	15	12,897	0,1307
Média geral		23,737	1,0792
Cv(%)		15,13	33,50

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 13A Resumo da análise de variância para a produção de matéria seca de raiz (MSR), parte aérea (MSPA) e frutos (MSF) do tomateiro sob doses de cádmio

Causa da variação	GL	Quadrado médio		
		MSR	MSPA	MSF
Doses	4	0,8473**	7,9957 ^{ns}	7,473 ^{ns}
Resíduo	15	0,1868	3,9606	6,8218
Média geral		1,8074	16,727	15,632
Cv(%)		23,92	11,90	16,71

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

ANEXO B

Tabela 1B Resumo da análise de variância para os teores de macronutrientes das raízes do tomateiro sob doses de chumbo

Causa da variação	GL	Quadrado médio				
		Teor g kg ⁻¹				
		K	P	Ca	Mg	S
Doses	4	129,88 ^{ns}	9,237**	9,7342 ^{ns}	0,9892 ^{ns}	5,182**
Resíduo	15	11,501	0,2345	1,7448	0,075	0,1078
Média geral		13,11	4,315	7,605	1,67	3,215
Cv(%)		25,87	11,22	17,37	16,40	10,21

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 2B Resumo da análise de variância para os teores de macronutrientes da parte aérea do tomateiro sob doses de chumbo

Causa da variação	GL	Quadrado médio				
		Teor g kg ⁻¹				
		K	P	Ca	Mg	S
Doses	4	2,877*	0,0057 ^{ns}	6,6992 ^{ns}	0,8587**	3,3219**
Resíduo	15	4,7385	0,0041	4,6776	0,1090	1,2928
Média geral		24,535	0,585	21,97	4,050	5,645
Cv(%)		8,87	11,03	9,84	8,15	20,14

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 3B Resumo da análise de variância para os teores de macronutrientes dos frutos do tomateiro sob doses de chumbo

Causa da variação	GL	Quadrado médio				
		Teor g kg ⁻¹				
		K	P	Ca	Mg	S
Doses	4	62,03**	0,0592*	0,0717 ^{ns}	0,1007**	0,2782 ^{ns}
Resíduo	15	6,7883	0,0275	0,075	0,0063	0,045
Média geral		24,61	1,195	1,180	1,190	2,06
Cv(%)		10,59	13,88	23,21	6,69	10,30

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 4B Resumo da análise de variância para os teores de micronutrientes das raízes do tomateiro sob doses de chumbo

Causa da variação	GL	Quadrado médio			
		Teor mg kg ⁻¹			
		Cu	Mn	Zn	Fe
Doses	4	123,12 ^{ns}	52446,8 ^{ns}	3743,4 ^{ns}	2116,27 ^{ns}
Resíduo	15	164,18	2898,01	1309,6	789,37
Média geral		69,285	157,83	125,77	1058,86
Cv(%)		18,49	34,11	28,77	2,65

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 5B Resumo da análise de variância para os teores de micronutrientes da parte aérea do tomateiro sob doses de chumbo

Causa da variação	GL	Quadrado médio			
		Teor mg kg ⁻¹			
		Cu	Mn	Zn	Fe
Doses	4	29,866**	2042,8**	253,87**	15968,6**
Resíduo	15	5,5376	354,17	69,037	5410,7
Média geral		7,560	144,56	74,170	528,56
Cv(%)		31,13	13,02	11,20	13,92

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 6B Resumo da análise de variância para os teores de micronutrientes dos frutos do tomateiro sob doses de chumbo

Causa da variação	GL	Quadrado médio			
		Teor mg kg ⁻¹			
		Cu	Mn	Zn	Fe
Doses	4	9,7312 ^{ns}	19,628**	42,030*	9851,87**
Resíduo	15	2,8875	5,5185	19,8418	4188,26
Média geral		6,7750	15,195	26,545	205,20
Cv(%)		25,08	15,46	16,78	31,54

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 7B Resumo da análise de variância para o índice de translocação (IT) de macronutrientes da parte aérea do tomateiro sob doses de chumbo

Causa da variação	GL	Quadrado médio				
		IT parte aérea				
		K	P	Ca	Mg	S
Doses	4	52,480 ^{ns}	19,47**	40,52**	115,53 ^{ns}	225,74**
Resíduo	15	9,974	1,0417	8,0107	7,198	30,233
Média geral		39,693	10,090	71,637	58,382	51,659
Cv(%)		7,96	10,12	3,95	4,60	10,64

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 8B Resumo da análise de variância para o índice de translocação (IT) de macronutrientes dos frutos do tomateiro sob doses de chumbo

Causa da variação	GL	Quadrado médio				
		IT frutos				
		K	P	Ca	Mg	S
Doses	4	203,67**	38,95**	0,697 ^{ns}	11,61**	29,55**
Resíduo	15	6,4337	4,0577	0,7533	1,6595	3,4422
Média geral		39,750	20,264	3,8570	17,167	18,718
Cv(%)		6,38	9,94	22,50	7,50	9,91

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 9B Resumo da análise de variância para o índice de translocação (IT) de micronutrientes da parte aérea do tomateiro sob doses de chumbo

Causa da variação	GL	Quadrado médio			
		IT parte aérea			
		Cu	Mn	Zn	Fe
Doses	4	47,645**	1136,0**	102,59 ^{ns}	2132,08 ^{ns}
Resíduo	15	13,0003	56,367	35,323	2198,04
Média geral		9,3098	50,031	33,765	39,934
Cv(%)		38,73	15,01	17,60	117,40

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 10B Resumo da análise de variância para o índice de translocação (IT) de micronutrientes dos frutos do tomateiro sob doses de chumbo

Causa da variação	GL	Quadrado médio			
		IT frutos			
		Cu	Mn	Zn	Fe
Doses	4	14,566 ^{ns}	8,329**	38,557 ^{ns}	17,710 ^{ns}
Resíduo	15	4,0001	0,947	13,705	8,804
Média geral		8,1551	5,152	12,424	11,301
Cv(%)		24,52	18,89	29,80	26,26

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 11B Resumo da análise de variância para o teor de chumbo nas raízes, parte aérea e frutos do tomateiro

Causa da variação	GL	Quadrado médio		
		Teor mg kg ⁻¹		
		Raízes	Parte aérea	Frutos
Doses	4	5670776**	204954,5**	778,51**
Resíduo	15	19652,37	1383,375	2,333
Média geral		1677,94	185,34	14,315
Cv(%)		8,35	20,07	10,67

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 12B Resumo da análise de variância para o índice de translocação de chumbo na parte aérea e frutos do tomateiro

Causa da variação	GL	Quadrado médio	
		IT	
		Parte aérea	Frutos
Doses	4	139,349**	1,491 ^{ns}
Resíduo	15	1,550	0,0102
Média geral		6,9110	0,6054
Cv(%)		18,01	16,76

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

Tabela 13B Resumo da análise de variância para a produção de matéria seca de raiz (MSR), parte aérea (MSPA) e frutos (MSF) do tomateiro sob doses de chumbo

Causa da variação	GL	Quadrado médio		
		MSR	MSPA	MSF
Doses	4	1,3063 ^{ns}	49,748**	73,085**
Resíduo	15	0,0983	3,389	6,7723
Média geral		1,9091	16,286	13,031
Cv(%)		16,43	11,30	19,97

ns não significativo pelo teste de F

*e ** significativo, a 5% e a 1%, pelo teste de F

ANEXO C



Figura 1C Imagem geral do experimento



Figura 2C Imagem geral do experimento (após a produção de frutos)



Figura 3C Raiz do tomateiro no tratamento controle



Figura 4C Raiz do tomateiro sob aplicação da dose de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ de Cd



Figura 5C Raiz do tomateiro sob aplicação da dose de $10,0 \text{ mg L}^{-1}$ de Pb



Figura 6C Raiz do tomateiro sob aplicação da dose de $4,0 \text{ mg L}^{-1}$ de Cd



Figura 7C Raiz do tomateiro sob aplicação da dose de $40,0 \text{ mg L}^{-1}$ de Pb



Figura 8C Produção de frutos no tratamento controle



Figura 9C Produção de frutos sob a aplicação da dose de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ de Cd



Figura 10C Produção de frutos sob a aplicação da dose de $10,0 \text{ mg L}^{-1}$ de Pb