

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**SELEÇÃO DE PLANTAS PARA FITORREMEDIAÇÃO  
DE SOLO CONTAMINADO COM COBRE**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Diogo Vendruscolo**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2013**

# **SELEÇÃO DE PLANTAS PARA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM COBRE**

**Diogo Vendruscolo**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Biodinâmica e Manejo do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo**.

**Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Josemar Seminoti Jacques**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2013**

VENDRUSCOLO, DIOGO  
SELEÇÃO DE PLANTAS PARA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO  
CONTAMINADO COM COBRE / DIOGO VENDRUSCOLO.-2013.  
57 p.; 30cm

Orientador: RODRIGO JOSEMAR SEMINOTI JACQUES  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-  
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2013

1. VITICULTURA 2. METAL PESADO 3. CONTAMINAÇÃO DO  
SOLO 4. FITOESTABILIZAÇÃO 5. FITOEXTRAÇÃO I. JACQUES,  
RODRIGO JOSEMAR SEMINOTI II. Título.

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo autor.

---

© 2013

Todos os direitos reservados a Diogo Vendruscolo. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Venâncio Aires, 2008, Bairro Centro, Santa Maria – RS. CEP: 97010-004.

E-mail: diogovendrus@yahoo.com.br

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

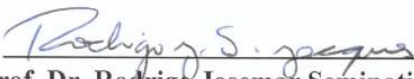
**SELEÇÃO DE PLANTAS PARA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO  
CONTAMINADO COM COBRE**

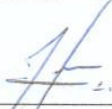
elaborado por


**Diogo Vendruscolo**


como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Ciência do Solo**

**COMISSÃO EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Rodrigo Josemar Seminoti Jacques**  
(Presidente/orientador – CCR/UFSM)

  
\_\_\_\_\_  
**Pesq. Dr. Alfredo do Nascimento Junior**  
(EMBRAPA)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Eduardo Giroto**  
(IFRS)

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Paulo Ademar Avelar Ferreira**  
(UFSM)

Santa Maria/RS, 27 de Fevereiro de 2013.

*Aos meus pais, Venilde e Leontino, pelo amor, carinho, educação, apoio e pela inspiração. Sem vocês eu não conseguiria ter dado passos tão importantes na minha vida.*

**Dedico.**

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela oportunidade de trabalhar e crescer frente às dificuldades e os desafios da vida e por colocar pessoas especiais no meu caminho.

À minha família em especial, à meus pais Venilde e Leontino que sempre me incentivaram a seguir em frente e alcançar meus objetivos. A vocês só tenho a agradecer por tudo que fizeram por mim. Obrigado por tudo. AMO VOCÊS.

À Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade de estudo.

Ao professor Rodrigo Josemar Seminoti Jacques, que sempre foi mais do que orientador, foi um exemplo de profissional e acima de tudo amigo, quem devo muito por esta empreitada.

Aos pesquisadores da Embrapa, Alfredo do Nascimento Junior e George Wellington Bastos de Melo pela colaboração na realização deste trabalho.

Ao professor Eduardo Giroto pela ajuda na realização deste trabalho.

Ao Pós-Doutorando Paulo Ademar Avelar Ferreira pelo apoio, pela amizade, pelos conhecimentos compartilhados e pela ajuda na finalização desta etapa.

Ao Doutorando Cledimar Rogério Lourenzi e ao Mestrando Tadeu Luis Tiecher pelo auxílio na realização das análises no laboratório de química e fertilidade do solo.

Ao auxílio de Natielo Almeida Santana, Marcos Leandro dos santos, Willian Braga dos Santos, Diego Armando Amaro da Silva, Francisco de Figueiredo Wesz na realização das etapas desse trabalho e pelo excelente convívio.

Aos colegas de laboratório de Microbiologia do Solo e Ambiente Afnan Suleiman, Cristiane Bianchi Loureiro, Daiana Bortoluzzi Baldoni, Daiane Fiuza Montagner, Daniel Pazzini Eckhardt, Edicarla Trentin, Fábio Pacheco Menezes, Francisco de Fegueiredo Wesz, Luana Orlandi, Lilian Cervo Cabreira, Manoeli Lupatini, Marcos Leandro dos Santos, Natielo Santana, Sabrina Barbosa Dahmer, Taís Backes e Willian Braga dos Santos pelo excelente convívio e pela amizade. Ao laboratorista Antônio Bassaco pela convivência e amizade.

Aos colegas de pós-graduação pelas dicas, auxílio, discussões e pela amizade.

Aos professores do Departamento de Solos João Kaminski, Zaida Inês Antonioli, Leandro Souza, Danilo Rheinheimer, Celso Aita, Sandro Giacomini, Ricardo Dalmolin, Jean Minella, Dalvan Reinert, José Miguel Reichert, Fabrício Pedron, Flávio Eltz, Telmo Amado, e Thomé Lovato, pelas conversas e pelo aprendizado durante o curso.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente ajudaram na realização deste trabalho.

**Meu sincero, muito obrigado!**

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Universidade Federal de Santa Maria

### SELEÇÃO DE PLANTAS PARA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO CONTAMINADO COM COBRE

AUTOR: DIOGO VENDRUSCOLO

ORIENTADOR: RODRIGO JOSEMAR SEMINOTI JACQUES

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 27 de fevereiro de 2013.

Aplicações sucessivas de calda bordalesa, um fungicida cúprico muito utilizado no controle de doenças na videira, contribuíram para o aumento dos teores de cobre em extensas áreas de vinhedos na Serra Gaúcha. A fitorremediação é uma tecnologia de remediação de solos que apresenta reduzido impacto ambiental, baixo custo e grande aceitação pública. O objetivo deste estudo é selecionar plantas de cobertura de solo de inverno e verão que sejam promissoras para a fitoestabilização e fitoextração do cobre em um solo da Serra Gaúcha com altos teores de cobre. Um Cambissolo foi coletado na Serra Gaúcha e foram adicionadas diferentes doses de cobre 0, 100, 200, 400, 500 e 600 mg kg<sup>-1</sup> na forma cloreto de cobre (66,66%) e sulfato de cobre (33,34%). Neste solo, em casa de vegetação foram cultivados nove genótipos de plantas de cobertura de inverno: aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) com quatro genótipos (“Vacaria”, “UPFA 21 Moreninha”, “Passo Fundo” e “IPFA 99009”), aveia para cobertura (*Avena brevis* L.) com o genótipo “BRS Centauro”, aveia branca (*Avena sativa* L.) com três genótipos (“URS 21”, “UPF 18” e “UPF 22”) e ervilhaca peluda (*Vicia villosa* Roth.) com uma cultivar (“SS Esmeralda”); e nove genótipos de plantas de cobertura de verão: milheto (*Pennisetum glaucum* L.), feijão de porco (*Canavalia ensiformis* DC.), mucuna preta (*Mucuna aterrima* L.), feijão guandu anão (*Cajanus cajan* L.), pensacola (*Paspalum notatum* L.), crotalaria (*Crotalaria juncea* L.), mucuna cinza (*Mucuna cinereum* L.), labe-labe (*Dolichos lablad* L.) e crotalaria (*Crotalaria spectabilis* Roth.). Quando cultivados em solos com altas concentrações de cobre, os genótipos de aveia preta “UPFA 21 Moreninha” e de aveia branca “URS 21” e as plantas de feijão de porco e mucuna preta produzem elevadas quantidades de massa seca, podendo ser utilizadas nestes solos, como plantas de cobertura de solo. O genótipo “Vacaria” de aveia preta, a mucuna preta e a mucuna cinza produzem elevadas quantidades de massa seca e acumulam elevadas concentrações de cobre no sistema radicular, apresentando potencial para serem utilizadas em programas de fitoestabilização de cobre.

**Palavras-chave:** Viticultura. Metal pesado. Contaminação do solo. Fitoestabilização. Fitoextração.



## ABSTRACT

Master Dissertation  
Graduate Program in Soil Science  
Federal University of Santa Maria

### SELECTION OF PLANTS FOR PHYTOREMEDIATION OF SOIL CONTAMINATED WITH COPPER

AUTHOR: DIOGO VENDRUSCOLO

ADVISOR: RODRIGO JOSEMAR SEMINOTI JACQUES

Date and place of the Defense: Santa Maria, February 27<sup>th</sup> 2013.

Successive applications of Bordeaux syrup, a copper fungicide widely used to control diseases on the vine, contributed to the increase in copper in large areas of vineyards in the Serra Gaúcha. Phytoremediation is a soil remediation technology that provides low environmental impact, low cost and wide public acceptance. The objective of this study is to select soil cover plants of winter and summer that are promising for phytostabilization and phytoextraction of copper in soil of Serra Gaúcha. A 'Cambissolo', was collected in the Serra Gaúcha and added different copper concentrations of 0, 100, 200, 400, 500 and 600 mg kg<sup>-1</sup> in the form of copper chloride (66.66%) and copper sulfate (33 , 34%). In this soil, in a greenhouse were grown nine genotypes of winter cover plants: black oat (*Avena stringosa* Schreb) With four genotypes ("UPFA 21 Moreninha", "Vacaria", "Passo Fundo" and "IPFA 99009"), cover oat (*Avena brevis* L.) with genotype ("BRS Centauro"), white oat (*Avena sativa* L.) with three genotypes ("URS 21", "UPF 18" and "UPF 22") and hairy vetch (*Vicia villosa* Roth) with a 'cultivate' ("SS esmeralda") and nine genotypes of summer cover plants: pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.), jack bean (*Canavalia ensiformis* DC), black mucuna bean (*Mucuna aterrima* L.), dwarf pigeonpea (*Cajanus cajan* L.), bahiagrass (*Paspalum notatum* L.), sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.), gray mucuna bean (*Mucuna cinereum* L.), dolichos bean (*Dolichos lablad* L.) and sunn hemp (*Crotalaria spectabilis* Roth). When grown in soils with high concentrations of copper, black oat genotypes "UPFA 21 Moreninha" and white oat "URS 21" and plants jack bean and black mucuna bean produce large amounts of dry, these soils can be used as ground cover plants. The genotype "Vacaria" oat, black mucuna bean and gray mucuna bean produce high amounts of dry matter and accumulate high concentrations of copper in the root system, with potential to be used in programs phytostabilization of copper.

**Keywords:** Viticulture. Heavy Metal. contamination of the soil. Phytostabilization. Phytoextraction.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>ARTIGO 1 -SELEÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO PARA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO DA SERRA GAÚCHA CONTAMINADO COM COBRE .....</b>	<b>13</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>13</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>14</b>
<b>Material e métodos .....</b>	<b>16</b>
<b>Resultados e discussão.....</b>	<b>18</b>
<b>Conclusões .....</b>	<b>26</b>
<b>Literatura citada.....</b>	<b>27</b>
<b>ARTIGO 2 - SELEÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA DE VERÃO PARA FITORREMEDIAÇÃO DO COBRE EM SOLO DA SERRA GAÚCHA .....</b>	<b>31</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>31</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>32</b>
<b>Material métodos .....</b>	<b>34</b>
<b>Resultados e discussão.....</b>	<b>37</b>
<b>Conclusões .....</b>	<b>43</b>
<b>Referências .....</b>	<b>44</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>56</b>

## INTRODUÇÃO

A vitivinicultura é uma atividade de grande importância econômica e social para o Rio Grande do Sul. Aproximadamente 95% do vinho e do suco de uvas produzidos no Brasil originam-se deste Estado e a Região da Serra Gaúcha concentra a maior parte desta produção (Embrapa, 2009). Estima-se que a Serra Gaúcha possua 31 mil hectares de vinhedos (aproximadamente 40% da área cultivada no país), distribuídos em aproximadamente 17.500 estabelecimentos rurais, com área média de apenas 15 hectares, sendo que destes, dois hectares, em média, são destinados ao cultivo da videira. A topografia acidentada dificulta a mecanização e os intensos tratos culturais exigidos pelas videiras (*Vitis vinifera* ou *V. labrusca*), demandam intensa mão de obra, normalmente familiar, com média de quatro pessoas por propriedade (Lessa, 2010).

A vitivinicultura na Serra Gaúcha iniciou com os imigrantes italianos a partir do ano de 1860, que introduziram a prática da utilização da calda bordalesa, suspensão coloidal obtida pela mistura de 100 g de sulfato de cobre e 100 g de hidróxido de cálcio em 10 litros de água, muito eficiente no controle das doenças como o míldio, causada pelo fungo *Plasmopara viticola*, e oídio, causada pelo fungo *Uncinula necator*. Em geral, a incidência destas doenças é alta devido ao clima úmido da Região, consequência dos vales que dominam a topografia regional e que são amplamente utilizados para o cultivo da videira. Em média, são realizadas, aproximadamente, 10 aplicações de calda bordalesa por ano. A grande maioria da calda aspergida nas folhas tem como destino o solo, devido ao escoamento causado pela água da chuva ou à senescência das folhas, o que pode introduzir até 30 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de cobre no solo (Nachigall et al., 2007; Casali et al., 2008; Girotto, 2010).

As aplicações sucessivas de calda bordalesa que ocorrem durante o ciclo das videiras, somado ao longo tempo em que as mesmas áreas vêm sendo utilizadas para a viticultura (50 anos ou mais) conduziram a adição de grandes quantidades de cobre no solo. O cobre é um micronutriente essencial para as plantas, participando como componente de diversas enzimas que catalisam o fluxo de elétrons e as reações de oxi-redução nas células. Entretanto, em altas concentrações no solo, esse elemento pode proporcionar alterações drásticas nas células vegetais, as quais podem resultar em perdas consideráveis para o potencial produtivo das plantas (Santos et al., 2004; Mantovani, 2009; Girotto, 2010).

Devido às elevadas quantidade de calda bordalesa adicionada aos vinhedos da Serra Gaúcha, ocorreu, com o passar dos anos, o acúmulo deste metal na superfície do solo,

ultrapassando seus teores críticos e a capacidade de adsorção destes solos (CQFSRS/SC, 2004; Casali et al., 2008). Estudos recentes indicam que as concentrações de cobre total no horizonte superficial dos vinhedos podem atingir valores de 506 a 718 mg kg<sup>-1</sup> (Casali et al., 2008; Mantovani, 2009), sendo que a concentração natural situa-se entre 40 e 50 mg kg<sup>-1</sup> (Mantovani, 2009).

Por consequência disso, Segundo Santos et al. (2004) a aveia preta, que é bastante utilizada como cobertura verde nos vinhedos, e até mesmo outras espécies nativas, têm apresentado desenvolvimento baixo, clorose e morte de plantas, o que pode agravar ainda mais o dano ambiental, uma vez que a ausência de vegetação aumenta o impacto da gota da chuva na superfície do solo e, por consequência, a sua degradação e o transporte de partículas de solo via escoamento superficial, potencializando a transferência do cobre para as águas superficiais e a sua percolação no perfil, uma vez que na ausência de raízes não há possibilidade de absorção e ciclagem do cobre no sistema solo-planta.

Diante deste cenário, alternativas para a remediação destes solos devem ser buscadas como forma de reduzir o risco de contaminação do subsolo, das águas superficiais e subsuperficiais, dos animais e pessoas da Região; e se possível, manter estes solos produtivos, para que a atividade da vitivinicultura não seja impedida de se manter, o que traria graves consequências econômicas e sociais para esta Região. A fitorremediação é uma tecnologia relativamente nova que visa a remediação dos solos contaminados através do uso de plantas, com custo razoável, baixo impacto ambiental e grande aceitação pública (Nascimento et al., 2009). A fitorremediação pode ser definida como o processo natural em que as plantas e os microrganismos da rizosfera sequestram, degradam ou imobilizam poluentes do solo (Pilon-Smits, 2005). Sob o termo fitorremediação estão incluídas diferentes técnicas com objetivos específicos e dentre essas, é interesse deste estudo a fitoextração e a fitoestabilização.

A fitoextração baseia-se no uso de plantas para remoção de metais dos solos mediante a absorção pelas raízes, transporte e concentração na parte aérea. Para o sucesso desta técnica é essencial que o solo não apresente altos níveis de contaminação e que a planta seja tolerante ao metal, apresente um sistema radicular abundante, possua uma taxa de crescimento rápido, tenha o potencial de produzir alta quantidade de biomassa no campo e acumule na parte aérea elevadas quantidades do metal (Marques et al., 2009). Além da utilização de plantas transgênicas, outras duas abordagens práticas podem ser utilizadas na fitoextração: a utilização de plantas com capacidade natural de acumulação de altas quantidades de metais, mas normalmente com baixa produção de biomassa (plantas hiperacumuladoras); ou a utilização de plantas com alta produção de biomassa, mas com menor capacidade de

acumulação de metais, normalmente associada a aplicação de agentes quelantes (Nascimento et al., 2009). Após o crescimento no campo as plantas podem ter seu volume reduzido por compostagem ou incineração e posteriormente, serem recicladas (biomineração) ou distribuídas em solos com baixos teores de metais pesados ou depositadas em aterro sanitário. Outra alternativa é a utilização das plantas para a produção de bioenergia (Blaylock & Huang, 2000; Marques et al., 2011).

Por outro lado, alguns solos podem estar tão contaminados que a fitoextração não seria uma abordagem adequada e o tempo necessário para remediação seria muito longo. Nestes casos, uma forma alternativa de diminuir o risco ambiental pode ser a fitoestabilização, onde plantas são utilizadas para estabilizar o metal no solo, reduzindo assim sua movimentação pela erosão e percolação, a exposição aos animais e a probabilidade de entrarem na cadeia alimentar (Wong, 2003). Além disso, as raízes das plantas também podem oferecer superfícies de precipitação ou adsorção de contaminantes metálicos (Laperche et al., 1997; Pereira et al., 2012). As plantas adequadas para fitoestabilização devem ser tolerantes às condições de solo, crescer rapidamente para estabelecer densa cobertura vegetal, ter sistemas radiculares densos, absorver grandes quantidades do metal mantendo-o nas raízes (baixa translocação raiz-parte aérea), serem fáceis de estabelecer e manter em condições de campo, e ter ciclos de vida longos ou serem capazes de auto-propagar (Berti & Cunningham, 2000, Santibáñez et al., 2008).

A existência de poucos estudos de seleção de plantas para fitoestabilização e fitoextração de cobre nos solos do Brasil, aliado ao baixo número de espécies, que reconhecidamente, sejam tolerantes às altas concentrações de Cu no solo, dificultam a implantação de programas de fitorremediação. Diante do grave cenário de contaminação por cobre nos solos de vinhedos do RS é urgente que haja estudos para a seleção de plantas de cobertura de solo, que tolerem altos teores de cobre no solo e que possam ser disponibilizadas aos produtores como alternativas para o cultivo destes solos, visando à redução dos riscos ambientais causados pelos altos teores deste metal no solo. Em vista do exposto, o objetivo deste estudo é selecionar plantas de cobertura de solo de inverno e verão que sejam promissoras para a fitoestabilização e fitoextração do cobre em solo contaminado da Serra Gaúcha.

## SELEÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA DE INVERNO PARA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO DA SERRA GAÚCHA CONTAMINADO COM COBRE

### RESUMO

O uso contínuo de calda bordalesa conduziu a contaminação por cobre de varias áreas de vinhedos da Serra Gaúcha. Diante deste cenário, plantas com potencial para fitoextração e fitoestabilização devem ser selecionadas visando a implantação de futuros programas de fitorremediação. O objetivo deste trabalho foi selecionar plantas de cobertura de inverno, que apresentam potencial para serem usadas em programas de fitoextração e fitoestabilização do cobre em solos de vinhedos da Serra Gaúcha. Um Cambissolo foi contaminado com doses crescentes de Cu 0, 100, 200 e 400 mg kg<sup>-1</sup> de solo. Em seguida foram cultivadas, em casa de vegetação, nove genótipos de plantas sendo eles: aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) com quatro genótipos (“Vacaria”, “UPFA 21 Moreninha”, “Passo Fundo” e “IPFA 99009”), aveia para cobertura (*Avena brevis* L.) com o genótipo “BRS Centauro”, aveia branca (*Avena sativa* L.) com três genótipos (“URS 21”, “UPF 18” e “UPF 22”) e ervilhaca peluda (*Vicia villosa* Roth.) com uma cultivar (“SS Esmeralda”). Após o florescimento as plantas foram coletadas e determinadas a produção de massa seca de parte aérea e sistema radicular, a concentração de Cu, P, K, Ca, Fe, Zn e N na parte aérea e de Cu no sistema radicular, bem como o fator de bioacumulação e o índice de translocação de Cu. O aumento da concentração de cobre no solo reduz a produção de massa seca e aumenta a concentração do cobre, na parte aérea e no sistema radicular, dos nove genótipos avaliados. As altas concentrações de Cu no solo influenciam a absorção de outros nutrientes pelos genótipos avaliados, porém este efeito é dependente do genótipo e do nutriente envolvido. Os genótipos de aveia preta “UPFA 21 Moreninha” e de aveia branca “URS 21”, quando cultivada em solos com altas concentrações de cobre produzem elevada quantidade de massa seca de parte aérea, apresentando potencial para serem utilizadas como plantas de cobertura de solo em áreas contaminadas com cobre. O genótipo “Vacaria” de aveia preta produz elevada quantidade de massa seca e acumula elevadas concentrações de cobre no sistema radicular, apresentando potencial para ser utilizada em programas de fitoestabilização de cobre.

**Termos de indexação:** viticultura, metal pesado, contaminação do solo, fitoestabilização, fitoextração.

**SUMMARY: SELECTION OF WINTER COVERAGE PLANTS FOR PHYTOREMEDIATION OF CONTAMINATED SOIL OF SERRA GAÚCHA WITH COPPER**

Continued use of Bordeaux syrup led to contamination by copper of several areas of vineyards in Serra Gaúcha. Given this scenario, plants with potential for phytoextraction and phytostabilization should be selected with a view to future implementation of phytoremediation programs. The aim of this work was to select winter cover plants that have potential for use in programs of phytostabilization and phytoextraction of copper in soils of vineyards in the Serra Gaúcha. A 'Cambissolo' was contaminated with increasing levels of Cu 0, 100, 200 and 400 mg kg<sup>-1</sup> of soil. Then were grown in a greenhouse, nine genotypes of plants which are: black oat (*Avena stringosa* Schreb) with four genotypes ("Vacaria", "UPFA 21 Moreninha", "Passo Fundo" and "IPFA 99009"), cover oat (*Avena brevis* L.) with genotype ("99012 IPFA"), white oat (*Avena sativa* L.) with three genotypes ("URS 21", "UPF 18" and "UPF 22") and hairy vetch (*Vicia villosa* Roth) with a 'cultivate' ("SS esmeralda"). After flowering the plants were collected and determined the dry matter production of shoot and root system, the concentration of Cu, P, K, Ca, Fe, Zn and shoot N and Cu in the root system, as well as the bioaccumulation factor and the rate of translocation of Cu. The increased concentration of copper in the soil reduces the dry matter production and increases the concentration of copper in the shoot and root system, out of nine evaluated genotypes. The high concentrations of Cu in soil influence the absorption of other nutrients by genotypes, but this effect is dependent on the genotype and the nutrient involved. The genotypes of black oat "UPFA 21 Moreninha" and white oat "URS 21" when grown in soils with high concentrations of copper produce high amount of dry mass of shoots, with potential to be used as cover crops on soil areas contaminated with copper. Genotype "Vacaria" black oat produces high amount of dry and accumulates high concentrations of copper in the root system, with potential to be used in programs phytostabilization of copper.

**Index terms:** viticulture, heavy metal, contamination of the soil, phytostabilization, phytoextraction.

## INTRODUÇÃO

A atividade da vitivinicultura na Serra Gaúcha foi iniciada a partir dos anos de 1860, com a chegada dos imigrantes italianos ao Rio Grande do Sul, que introduziram a prática da utilização da calda bordalesa, suspensão coloidal obtida pela mistura de 100 g de sulfato de cobre e 100 g de hidróxido de cálcio em 10 litros de água, muito eficiente no controle das doenças como o míldio,

causada pelo fungo *Plasmopora viticola*, e oídio, causada pelo fungo *Uncinula necator*. Em geral, a incidência destas doenças é alta na Região devido ao clima úmido, consequência dos vales que dominam a topografia regional e que são amplamente utilizados para o cultivo da videira. Em média são realizadas 10 aplicações deste fungicida por ano, o que resulta na introdução de até 30 kg ha<sup>-1</sup> ano de cobre no solo (Nachigall et al., 2007; Casali et al., 2008).

As aplicações sucessivas de calda bordalesa que ocorrem durante o ciclo das videiras, somado ao longo tempo em que as mesmas áreas vêm sendo utilizadas para a viticultura conduziram a adição de grandes quantidades de cobre no solo. Estudos recentes indicam que as concentrações de cobre total no horizonte superficial dos vinhedos podem atingir valores superiores a 500 mg kg<sup>-1</sup> (Casali et al., 2008), sendo que a concentração média situa-se em torno de 20 mg kg<sup>-1</sup>, variando de 6 a 80 mg kg<sup>-1</sup> (Tavares & Carvalho, 1992). Estas elevadas concentrações no horizonte superficial ultrapassaram a capacidade de sorção do solo, o que tem conduzido ao aumento da concentração do cobre em subsuperfície (Casali et al., 2008).

As plantas de cobertura, como a aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.), que são normalmente cultivadas nos vinhedos durante o inverno, período em que a videira encontra-se sem folhas, assim como plantas de ocorrência espontânea, têm apresentado crescimento reduzido da parte aérea e raiz, clorose seguido de morte, devido à fitotoxicidade do cobre nos solos dos vinhedos (Santos et al., 2004). Por consequência disso, o fraco ou ausente crescimento de plantas de cobertura de inverno ou espontâneas nestes solos pode agravar ainda mais o dano ambiental, uma vez que em uma topografia muito acidentada, a ausência de vegetação aumenta o transporte de partículas do solo via escoamento superficial, potencializando a transferência do cobre para as águas superficiais. Diante deste cenário, faz-se necessário de que sejam disponibilizadas estratégias para a recuperação desses solos, ou a minimização dos impactos ambientais oriundos da contaminação (Zancheta et al., 2011).

A fitorremediação é uma tecnologia que visa o tratamento dos solos contaminados, com custo razoável, baixo impacto ambiental e grande aceitação pública (Marques et al., 2011). Para tanto, é necessário à seleção de plantas que apresentam capacidade de tolerar altas concentrações de cobre no solo. Em plantas utilizadas para a fitoextração, estudos indicam a presença de mecanismos de tolerância aos metais pesados, como a alteração na atividade das enzimas antioxidantes (catalase e superóxido dismutase), a complexação do metal em substâncias intracelulares (fitoquelatinas e metalotioninas) e o sequestro em compartimentos do vacúolo (Krämer et al., 2000). Em plantas utilizadas na fitoestabilização ocorre a precipitação dos metais na raiz, evitando sua translocação para a parte aérea, como por exemplo, a ligação do metal às substâncias pécicas das paredes de células do córtex da raiz (Mengel & Kirkby, 1987).



Em vista do problema ambiental resultante das extensas áreas contaminadas com altas concentrações de cobre na Serra Gaúcha, da capacidade das plantas apresentarem diferentes mecanismos de tolerância às altas concentrações dos metais pesados na parte aérea e no sistema radicular e da falta de estudos visando à identificação dessas. O objetivo deste trabalho foi selecionar plantas de cobertura de inverno, que apresentam potencial para serem usadas em programas de fitoextração e fitoestabilização do cobre em solos cultivados com vinhedos da Serra Gaúcha.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização do experimento, foi utilizado um Cambissolo Húmico, um dos principais solos destinados ao cultivo das videiras na Região da Serra Gaúcha. A coleta ocorreu em uma área de mata nativa de mata nativa da Embrapa Uva e Vinho (Bento Gonçalves/RS), a uma profundidade de 0-20 cm. A análise desse solo foi realizada conforme Silva (1999) e resultou nas seguintes características: argila 500 g kg<sup>-1</sup>; matéria orgânica 35 g kg<sup>-1</sup>; pH<sub>(água 1:1)</sub> 4,0; P<sub>(Mehlich-1)</sub> 3,7 mg dm<sup>-3</sup>; K<sub>(Mehlich-1)</sub> 92,0 mg dm<sup>-3</sup>; Cu<sub>(Mehlich-1)</sub> 2,9 mg dm<sup>-3</sup>; Zn<sub>(Mehlich-1)</sub> 3,3 mg dm<sup>-3</sup>; Saturação de bases 9,0%; H+Al 30,7 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>; Saturação com alumínio: 60,5%.

O solo foi seco e peneirado, e para elevar o pH a 5,5, foram adicionadas doses de hidróxido de cálcio e óxido de magnésio na proporção molar de Ca e Mg de 2:1, sendo o solo incubado com umidade de 80% da capacidade de campo por período de 60 dias. A adição de NPK, para todos os genótipos, foi realizada segundo as recomendações do Manual de Adubação e Calagem (CQFS RS/SC, 2004). A contaminação das amostras de solos com doses crescentes de cobre foi realizada na forma de solução de cloreto de cobre (66,66%) e sulfato de cobre (33,34%) adicionando-se 0 (testemunha), 100, 200 e 400 mg kg<sup>-1</sup> de cobre no solo. Após ser cultivado com plantas de cobertura de verão, este solo apresentava as seguintes características: argila 510 g kg<sup>-1</sup>; matéria orgânica 36 g kg<sup>-1</sup>; pH<sub>(água 1:1)</sub> 5,1; P<sub>(Mehlich-1)</sub> 6,0 mg dm<sup>-3</sup>; K<sub>(Mehlich-1)</sub> 68,0 mg dm<sup>-3</sup>; Cu<sub>(Mehlich-1)</sub> 2,9 mg dm<sup>-3</sup>; Zn<sub>(Mehlich-1)</sub> 4,2 mg dm<sup>-3</sup>; Saturação de bases 75,6%; H+Al 4,9 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>; Saturação com alumínio: 1,3%. Antes da semeadura das plantas de cobertura de inverno foi realizada a correção de fertilidade deste solo com a adição de quantidades correspondentes a 40 kg ha<sup>-1</sup> de P e 50,2 kg ha<sup>-1</sup> de K para todos os genótipos estudados. A aplicação de nitrogênio foi realizada através da adição N mineral, dividida em duas aplicações, sendo uma na semeadura e outra em cobertura, totalizando uma quantidade aplicada correspondente a 40 kg ha<sup>-1</sup>.

Neste solo foi semeado, no dia 04 de abril de 2012, nove genótipos de plantas de cobertura de inverno, sendo eles: aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) com quatro genótipos (“Vacaria”,

“UPFA 21 Moreninha”, “Passo Fundo” e “IPFA 99009”), aveia para cobertura (*Avena brevis* L.) com o genótipo “BRS Centauro”, aveia branca (*Avena sativa* L.) com três genótipos (“URS 21”, “UPF 18” e “UPF 22”) e ervilhaca peluda (*Vicia villosa* Roth.) com um genótipo (“SS Esmeralda”). Como controle, um solo sem plantas foi mantido nas mesmas condições dos solos cultivados. Desta forma, o experimento constituiu-se de 40 tratamentos em esquema fatorial 4 x 10, com quatro doses de cobre e nove genótipos de plantas, mais o solo sem cultivo, dispostos em delineamento inteiramente casualizado, com 3 repetições, totalizando 120 unidades experimentais.

Para o cultivo das plantas em casa de vegetação, vasos plásticos com capacidade de 5 litros foram preenchidos com 4 kg de solo. Em cada vaso foi semeado 15 sementes de cada genótipo de planta, sendo realizado o desbaste oito dias após a germinação, deixando-se seis plantas por vaso até o final do experimento. A irrigação foi realizada diariamente com água destilada, através da pesagem dos vasos, de forma que fosse mantida a umidade do solo em 80% da capacidade de campo.

Após o início do florescimento, aproximadamente 60 dias após a semeadura, as plantas começaram a ser coletadas e separadas em parte aérea (PA) e sistema radicular (SR). A coleta das raízes foi realizada manualmente e após estas foram lavadas com água destilada e EDTA 0,02 mol L<sup>-1</sup> para retirada dos resíduos de solo. Em seguida, parte aérea e sistema radicular foram acondicionados em sacos de papel e levadas para secagem em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C até atingir massa constante. O material vegetal foi pesado para obtenção da massa seca e moído em moinho do tipo Willey. A concentração de Cu, Zn, Ca, Fe, P e K no tecido vegetal foram determinadas em espectrofotômetro de absorção atômica (marca GBC, mod. 932 AA., Austrália), após a realização da digestão nítrico-perclórica (Tedesco et al., 1995). Além disso, foi determinada a concentração de N total na parte aérea por destilação micro-Kjeldahl, após a digestão sulfúrica (Tedesco et al., 1995).

O Fator de Bioacumulação (FB) de cobre nos genótipos foi obtido pela divisão entre a concentração do cobre na parte aérea da planta e a concentração do cobre disponível no solo, extraído pelo método Melich-1. O Índice de Transferência (IT) foi obtido pela divisão entre a concentração do cobre na parte aérea e a concentração no sistema radicular.

Os dados foram submetidos à análise de variância, por meio do uso do programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2003). Posteriormente, foram realizadas análises de correlações de Pearson calculadas entre as concentrações de Cu, P, K, Ca, Fe, Zn e N na parte aérea das plantas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Disponibilidade de cobre no solo

A adição de doses de cobre de 0, 100, 200 e 400 mg kg<sup>-1</sup> na forma de cloreto de cobre (66,66%) e sulfato de cobre (33,34%), resultaram em teores disponíveis no solo de 0,94; 24,36; 48,77 e 111,40 mg kg<sup>-1</sup> de Cu extraído por Melich-1, de 1,83; 27,45; 96,75 e 174,64 mg kg<sup>-1</sup> de Cu extraído por HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup> e de 6,44; 84,89; 136,00 e 207,78 mg kg<sup>-1</sup> extraído por Na<sub>2</sub>-EDTA 0,01mol L<sup>-1</sup>/acetato de amônio 1,0 mol L<sup>-1</sup>. Mantovani (2009) estudando solos com cultivos de videiras a mais 40 anos na Serra Gaúcha encontrou valores de Cu-extraível com solução HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup> de aproximadamente 160 e 225 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, para Cambissolo e Neossolo na camada de 0-20 cm de profundidade. Resultados semelhantes também foram observados por Giroto (2010) em solos de vinhedos da Serra Gaúcha classificados como Cambissolos, onde foram extraídos valores de 95,7 a 328,7 mg kg<sup>-1</sup> de Cu, extraído por Na<sub>2</sub>-EDTA 0,01mol L<sup>-1</sup>/acetato de amônio 1,0 mol L<sup>-1</sup>. Assim, os valores observados no solo utilizado no presente trabalho estão de acordo com aqueles ocorrentes na Região da Serra gaúcha.

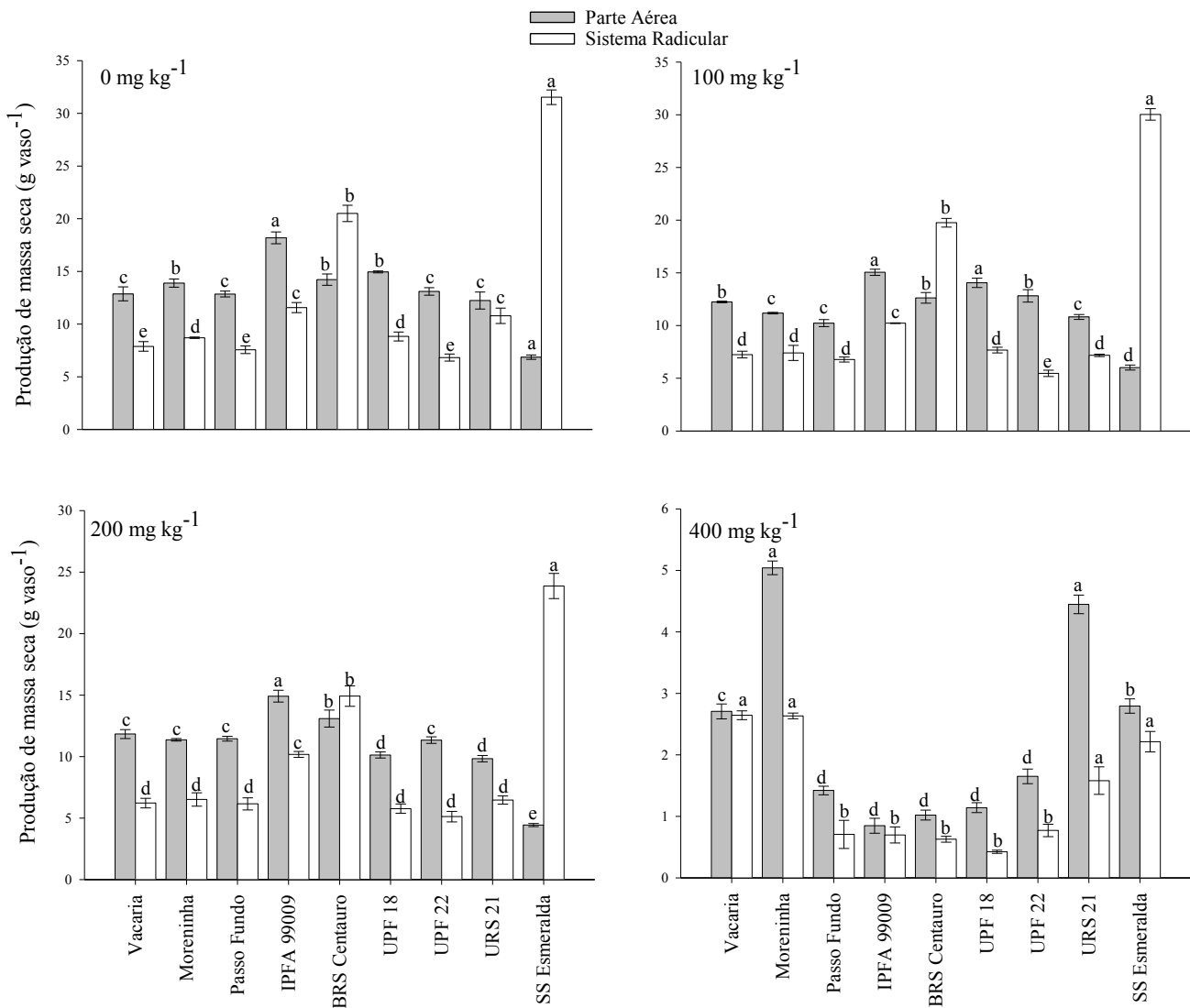
### Produção de massa seca de parte aérea e sistema radicular

A produção de massa seca dos nove genótipos avaliados diminuiu com o aumento das doses de cobre aplicadas ao solo (Figura 1). Embora tenha ocorrido diminuição na produção de (MSPA) e do sistema radicular (MSSR) nas doses de 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup> em relação a testemunha, as maiores reduções foram observadas na maior dose de cobre aplicada ao solo (400 mg kg<sup>-1</sup>). Foi também na maior dose que os genótipos de plantas apresentaram sintomas mais visíveis de toxicidade por Cu, como redução do crescimento e clorose nas folhas (dados não apresentados).

Na dose de 100 mg kg<sup>-1</sup> todos os genótipos testados apresentaram desempenho semelhante a dose 0 mg kg<sup>-1</sup> (testemunha), os genótipos “IPFA 99009” e “UPF 18” são os que produziram maior quantidade MSPA nessa dosagem com 15,06 e 14,06 g vaso<sup>-1</sup>, respectivamente, já o genótipo “SS Esmeralda” foi o que produziu menor quantidade de MSPA com 6,02 g vaso<sup>-1</sup> (Figura 1). Porém se comparado com a MSPA da testemunha, houve maior diminuição para três genótipos de aveia preta (“UPFA 21 Moreninha”, “Passo Fundo” e “IPFA 99009”) onde a produção de MS foi menor que 90% em relação à testemunha. Na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup> foi também o genótipo de aveia preta “IPFA 99009” que produziu maior quantidade de MSPA com 14,91, e o genótipo de ervilhaca peluda “SS Esmeralda” o que menos produziu. Já na dose de 400 mg kg<sup>-1</sup> todas as plantas testadas reduziram a MSPA em mais de 50% a produção. Os genótipos “UPFA 21 Moreninha” e “URS 21”

foram os que apresentaram os melhores desempenhos produzindo, respectivamente, 36,4%, 37,6% e 39,3% da produção da MSPA da testemunha (Figura 1). A redução na produção de MS ocorre porque embora o Cu seja um micronutriente essencial para o crescimento das plantas, possuindo funções importantes em vários processos fisiológicos como a respiração, fotossíntese, distribuição de carboidratos, redução e fixação de nitrogênio e metabolismo de proteínas (Yruela, 2005), quando em altas concentrações no solo pode ser absorvido em maior quantidade pelas plantas, causando danos ao transporte de elétrons, redução do número e do volume dos cloroplastos, o que afeta negativamente a atividade fotossintética da planta (Panou-Filotheou et al., 2001). Além disso, o excesso de cobre pode causar estresse oxidativo na planta, por meio da geração de espécies reativas de oxigênio (Benavides et al., 2005).

O efeito do Cu na produção de MSSR foi semelhante aos resultados encontrados para a parte aérea, reduzindo a quantidade produzida de MSSR conforme se aumentava os teores de Cu no solo (Figura 1). Na dose de 100 mg kg<sup>-1</sup>, o genótipo “SS Esmeralda”, única leguminosa estudada neste experimento, destacou-se das demais produzindo elevada quantidade de MSSR com 30,03 g vaso<sup>-1</sup>, enquanto que a maioria dos demais genótipos não produziram quantidades superiores a 10 g vaso<sup>-1</sup> de MSSR. Na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup>, foi observado a mesma situação da dosagem anterior, com pequenas reduções na quantidade MSSR produzida. Na maior concentração de cobre adicionado ao solo, destacaram-se os genótipos “Vacaria”, “UPFA 21 Moreninha”, “URS 21” e “SS Esmeralda” que apresentaram as maiores quantidades de MSPA produzida. No entanto, quando comparado com a testemunha, os melhores desempenhos são dos genótipos “Vacaria” e “UPFA 21 Moreninha” que apresentaram as menores reduções de crescimento, produzindo, respectivamente, 37,2% e 30,3 % de MSSR em relação à testemunha, enquanto que, os demais genótipos não produziram mais que 15% da quantidade de MSSR produzida pela testemunha. Os resultados demonstram que ocorreu na maioria dos genótipos uma redução, ligeiramente maior da MSSR em relação à MSPA, principalmente nas doses mais elevadas do metal, comportamento também observado por Andreatza (2009) e Girotto (2010) no cultivo de aveia em solos contaminados com cobre de vinhedos da Serra Gaúcha. Segundo Qian et al. (2005) este fato pode ter ocorrido porque o Cu inibe de forma mais drástica o crescimento das raízes, em relação ao crescimento da parte aérea. De todo modo, estes resultados indicam que existe entre os genótipos avaliados diferenças na tolerância ao excesso de cobre no solo, conforme discutido também por Ke et al. (2007) e Zancheta et al. (2011).



**Figura 1.** Produção de massa seca (g vaso<sup>-1</sup>) da parte aérea e do sistema radicular no estágio de florescimento de quatro genótipos de aveia preta (“Vacaria”, “UPFA 21 Moreninha”, “Passo Fundo” e “IPFA 99009”), um genótipo de aveia para cobertura (“BRS Centauro”), três genótipos de aveia branca (“UPF 18”, “UPF 22” e “URS 21”) e um genótipo de ervilhaca peluda (“SS Esmeralda”), cultivadas em Cambissolo da Serra Gaúcha, contaminado com 0, 100, 200 e 400 mg kg<sup>-1</sup> de Cu. Letras iguais no mesmo tratamento não diferem entre si pelo teste de Scott-knot (p<0,05).

#### Acúmulo de Cu na parte aérea e no sistema radicular das plantas

As doses de cobre testadas exerceram grande influência sobre o acúmulo de Cu nos tecidos das plantas, principalmente no sistema radicular (Quadro 1). Os teores acumulados no tecido foram proporcionais a concentração do metal no solo, tendo incrementos mais significativos na dose de

400 mg kg<sup>-1</sup> de Cu adicionada ao solo. A concentração do metal na parte aérea variou de 15,39 a 59,64 mg kg<sup>-1</sup> de massa seca, enquanto que nas raízes a concentração de Cu teve uma variação de 29,35 a 1149,03 mg kg<sup>-1</sup>. A maior concentração de Cu no sistema radicular está de acordo com os resultados de Xia & Shen (2007); Girotto (2010) e Zanqueta et al. (2011), o que pode estar relacionado à baixa translocação do metal para a parte aérea.

O genótipo de ervilhaca peluda “SS Esmeralda” foi aquele que mais acumulou Cu na parte aérea em todas as doses de cobre adicionadas ao solo (Quadro 1). Na dose de 400 mg kg<sup>-1</sup>, este genótipo obteve um acúmulo médio de 59,64 mg kg<sup>-1</sup>, o que representaria uma quantidade de Cu extraído por ha de 125 g por cultivo, considerando uma produção de MS de aproximadamente 2100 kg ha<sup>-1</sup>. Portanto, dentre os genótipos de plantas estudados esta é a que possui características mais próximas às características requeridas para ser enquadrada com fitoextratora, que segundo Marques et al. (2009), deve possuir tolerância ao metal, taxa de crescimento rápido, potencial de produzir alta biomassa no campo e acumular na parte aérea elevadas quantidades do metal. Apesar de não ser considerada uma planta acumuladora de Cu, que segundo Boyd (2007) deve concentrar mais de 100 mg kg<sup>-1</sup> na parte aérea, o genótipo de ervilhaca peluda apresentou mais que o dobro da concentração de Cu considerada normal (5-25 mg kg<sup>-1</sup>) na parte aérea, apresentando potencial para ser melhor estudada visando sua utilização em programas de fitoextração de Cu. Em estudo realizado por Santos et al. (2010), onde foram testadas quatro espécies vegetais (*Hybiscus canabinnus*, *Brassica juncea*, *Raphanus sativus* e *Amaranthus crentus*) quanto a capacidade de fitoextração de metais pesados do solo, foi observado que nenhuma das destas espécies apresentou capacidade de acumular grande quantidade de Cu na parte aérea. Neste sentido, Andrezza et al. (2010) em experimento realizado com o cultivo de amendoim forrageiro, relata que as concentrações de Cu na parte aérea da planta ficaram entre 50 a 60 mg kg<sup>-1</sup>, concluindo que a espécie apresenta potencial para ser usada em programas de fitorremediação em solos contaminados com cobre.

Todos os genótipos de plantas testados apresentaram maior acúmulo de Cu no sistema radicular, destacando-se os genótipos de aveia preta e aveia de cobertura (Quadro 1), especialmente os genótipos “Vacaria” e “IPFA 99009” que obtiveram teores médios de 1149,03 e 930,48 mg kg<sup>-1</sup>. Esta característica torna estes genótipos aptos a serem usadas em programas de fitoestabilização, que é recomendada para aqueles casos em que o solo esteja tão contaminado que a fitoextração não seria uma abordagem adequada e o tempo para remediação seria muito longo. De acordo com Berti & Cunningham (2000) e Santibáñez et al. (2008) as plantas para serem consideradas fitoestabilizadoras devem absorver grandes quantidades do metal, mantendo-o nas raízes (baixa translocação raiz-parte aérea). As espécies com essas características podem facilitar o processo de imobilização do metal, evitando seu transporte para outros compartimentos ambientais, tendo em

vista que os metais pesados podem ligar-se facilmente aos compostos orgânicos das raízes, formando complexos mais estáveis e menos tóxicos ao ambiente (Accioly & Siqueira, 2000; Melo et al., 2009).

**Quadro 1. Concentração de Cu (mg kg<sup>-1</sup>) na parte aérea e sistema radicular no estágio de florescimento de quatro genótipos de aveia preta (“Vacaria”, “UPFA 21 Moreninha”, “Passo Fundo” e “IPFA 99009”), um genótipo de aveia para cobertura (“BRS Centauro”), três genótipos de aveia branca (“UPF 18”, “UPF 22” e “URS 21”) e um genótipo de ervilhaca peluda (“SS Esmeralda”) em solo contaminado com 0, 100, 200 e 400 mg kg<sup>-1</sup> de Cobre.**

Genótipos	Concentração de Cu na PA				Concentração de Cu no SR			
	0	100	200	400	0	100	200	400
<b>Vacaria</b>	15,64 c	17,32 d	19,00 e	21,40 g	48,30 a	205,21 a	359,07 a	1149,03 a
<b>Moreninha</b>	16,65 b	18,04 d	20,69 d	22,85 f	39,53 a	174,85 c	325,85 b	854,61 c
<b>Passo Fundo</b>	16,11 c	17,80 d	18,04 e	20,06 h	29,35 a	172,07 c	273,67 c	839,04 c
<b>IPFA 99009</b>	15,39 c	19,15 c	20,45 d	24,78 e	34,07 a	171,38 c	272,66 c	930,48 b
<b>BRS Centauro</b>	15,45 c	18,76 c	21,65 d	31,03 b	49,72 a	167,51 c	226,26 d	855,63 c
<b>UPF 18</b>	17,52 b	20,00 c	22,37 c	29,11 c	47,28 a	186,46 b	291,00 c	597,90 e
<b>UPF 22</b>	16,36 c	23,33 b	24,52 b	25,26 e	32,44 a	171,18 c	241,69 d	687,16 d
<b>URS 21</b>	16,36 b	23,68 b	25,35 b	27,42 d	31,99 a	162,01 d	207,25 e	436,05 g
<b>SS Esmeralda</b>	21,21 a	28,38 a	37,80 a	59,64 a	39,94 a	148,56 d	281,86 c	569,78 f

Letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-knot ( $p < 0,05$ ).

#### **Fator de bioacumulação e índice de transferência**

Os valores do fator de bioacumulação (FB) variaram de 0,19 a 21,62 (Quadro 2). O genótipo de ervilhaca peluda foi a que apresentou os maiores resultados em todas as concentrações de cobre no solo, mostrando possuir maior habilidade em acumular o Cu na parte aérea em relação à concentração disponível deste metal no solo. Na concentração de 100 mg kg<sup>-1</sup> e 200 mg kg<sup>-1</sup> destacaram-se também os genótipos de aveia branca “UPF 22” e “URS 21”. Na maior concentração, além da ervilhaca, destacaram-se os genótipos “UPF 18” e “BRS Centauro” que apresentaram os maiores valores de FB entre os genótipos de aveia. A diferença entre os fatores de bioacumulação evidenciam as distintas capacidades das plantas em absorver o metal da solução no solo. Resultados

semelhantes foram encontrados por Andreazza et al. (2011), que verificaram fatores de bioacumulação variando entre 0,74 a 3,83 em amendoim perene, em diferentes tipos de solo contaminados com cobre.

Os índices de transferência (IT) de Cu variaram de 0,02 a 0,55 (Quadro 2). Os resultados encontrados em todas as doses de Cu revelam que os genótipos “URS 21”, “UPF 22” e “SS Esmeralda” são os que apresentam maior capacidade em translocar o metal do sistema radicular para a parte aérea, em especial nas adições de 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto que o genótipo de ervilhaca destaca-se na adição de 400 mg kg<sup>-1</sup>. No entanto, os valores observados demonstram restrição na translocação de Cu para a parte aérea, já que somente valores superiores a 1,0 são considerados elevados (Yoon et al., 2006). Valores semelhantes foram encontrados por Andreazza et al. (2011) no cultivo de amendoim perene, em diferentes classes de solos contaminados por cobre, os autores verificaram variação de 0,04 a 0,41. Melo et al. (2009) testaram quatro espécies de plantas quanto a capacidade de translocação de As, concluindo que as plantas de amendoim e estilante apresentam maior translocação que aveia e azevém, ainda segundo os autores esses resultados podem estar relacionados a mecanismos de controle interno, evitando a translocação para tecidos metabolicamente ativos da parte aérea em Poaceae.



**Quadro 2: Fator de bioacumulação e índice de transferência no estágio de florescimento de quatro genótipos de aveia preta (“Vacaria”, “UPFA 21 Moreninha”, “Passo Fundo” e “IPFA 99009”), um genótipo de aveia para cobertura (“BRS Centauro”), três genótipos de aveia branca (“UPF 18”, “UPF 22” e “URS 21”) e um genótipo de ervilhaca peluda (“SS Esmeralda”) em solo contaminado com 0, 100, 200 e 400 mg kg<sup>-1</sup> de Cobre.**

Genótipos	Fator de Bioacumulação				Índice de Transferência			
	0	100	200	400	0	100	200	400
<b>Vacaria</b>	16,86	0,71	0,39	0,19	0,32	0,08	0,05	0,02
<b>Moreninha</b>	17,96	0,74	0,43	0,20	0,42	0,10	0,06	0,03
<b>Passo Fundo</b>	17,37	0,73	0,38	0,18	0,55	0,10	0,06	0,02
<b>IPFA 99009</b>	16,54	0,79	0,43	0,22	0,45	0,11	0,07	0,02
<b>BRS Centauro</b>	16,64	0,77	0,45	0,28	0,31	0,11	0,09	0,04
<b>UPF 18</b>	18,84	0,82	0,47	0,26	0,37	0,11	0,08	0,05
<b>UPF 22</b>	17,50	0,96	0,51	0,23	0,50	0,14	0,10	0,04
<b>URS 21</b>	17,59	0,97	0,53	0,25	0,52	0,15	0,12	0,06
<b>SS Esmeralda</b>	21,62	1,17	0,77	0,52	0,51	0,19	0,13	0,10

### **Efeito do cobre na absorção de outros elementos**

As altas concentrações de Cu no ambiente radicular podem influenciar a absorção e o metabolismo de outros nutrientes afetando o desenvolvimento das plantas (Weber et al., 1991; Llorens et al., 2000). A análise de correlação entre os teores de Cu com o P na parte aérea revela uma correlação significativa e negativa como a maioria dos genótipos, exceto para os genótipos “Vacaria”, “Moreninha” e “Passo Fundo” (Quadro 3). Ke et al. (2007) verificou diminuição na absorção de P em plantas de *Rumex japonicus*, em solo de uma mina contaminado com cobre, e segundo o autor pode estar relacionado ao grau tolerância que a planta apresenta em relação ao contaminante, pois a toxicidade do Cu causa danos à membrana plasmática das células das raízes, causando perda de íons e peroxidação lipídica. O efeito das altas concentrações de cobre no solo sobre absorção do P foi até o momento abordado por poucos estudos. Farias (2012) em estudo realizado com genótipos de batata, verificou diferença na absorção de P entre os genótipos, em solos da Serra Gaúcha houve aumento na absorção de P com o aumento das concentrações de Cu, já

em solos da Campanha Gaúcha ocorreu o contrário, o que ser explicado, segundo a autora, pela diferença no teor de matéria orgânica e pelos atributos físicos dos solos.

O K apresentou correlação positiva e significativa para todas as culturas, com exceção do genótipo “URS 21” que não foi significativa. Para os demais nutrientes não foi possível observar uma tendência clara nas correlações entre os genótipos e as concentrações de cobre adicionadas ao solo (Quadro 3). Zanqueta et al. (2011) em plantas de sorgo observaram correlação negativa do Cu com Zn e Ca, no entanto para o feijão de porco houve correlação negativa do Cu com o Ca e Fe. Em experimento com *Coluna vulgaris*, Monni et al. (2000) encontraram correlação positiva para o K e negativa para Ca e Fe nas folhas, com o aumento da concentração de cobre. No entanto, Ke et al. (2007) em solo de uma mina de cobre verificaram aumento na absorção de Ca em plantas de *Rumex japonicus* e diminuição na absorção de Fe.

Os metais pesados podem interferir na absorção e transporte de nutrientes essenciais às plantas e assim provocar distúrbios na composição nutricional destas (Monni et al., 2000; Ke et al., 2007). Os resultados demonstram efeito variável entre a concentração de Cu e de outros nutrientes na parte aérea das plantas testadas, mostrando que altas concentrações de Cu no solo causam interferência na absorção de outros nutrientes.

**Quadro 3: Correlações de Pearson entre a concentração de cobre (Cu) ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) e outros elementos na parte aérea no estádio de florescimento de quatro genótipos de aveia preta (“Vacaria”, “UPFA 21 Moreninha”, “Passo Fundo” e “IPFA 99009”), um genótipo de aveia para cobertura (“BRS Centauro”), três genótipos de aveia branca (“UPF 18”, “UPF 22” e “URS 21”) e um genótipo de ervilhaca peluda (“SS Esmeralda”) em solo contaminado com 0, 100, 200 e 400  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cobre.**

Genótipos de plantas	P	K	Fe	Ca	Zn	N
<b>Vacaria</b>	0,60*	0,64*	-0,32	-0,45	0,94*	0,68*
<b>Moreninha</b>	0,55	0,65*	-0,68*	-0,22	0,46	-0,19
<b>Passo Fundo</b>	0,33	0,63*	0,24	0,51	0,82*	0,71*
<b>IPFA 99009</b>	-0,82*	0,65*	0,59*	0,53	0,94*	0,49
<b>BRS Centauro</b>	-0,92*	0,91*	0,93*	0,83*	0,95*	0,77*
<b>UPF 18</b>	-0,97*	0,96*	-0,55	-0,40	-0,78*	-0,61*
<b>UPF 22</b>	-0,26	0,62*	0,60*	0,01	0,65*	0,87*
<b>URS 21</b>	-0,61*	0,41	-0,61*	0,09	0,46	-0,13
<b>SS Esmeralda</b>	-0,73*	0,97*	0,81*	0,16	-0,40	0,82*

\*  $p < 0,05$

## CONCLUSÕES

1. O aumento da concentração de cobre no solo reduz a produção de massa seca e aumenta a concentração do cobre, na parte aérea e no sistema radicular, dos nove genótipos avaliados;
2. Os genótipos de aveia preta “UPFA 21 Moreninha” e de aveia branca “URS 21”, quando cultivada em solos com altas concentrações de cobre, produzem elevada quantidade de massa seca de parte aérea, apresentando potencial para serem utilizadas como plantas de cobertura de solo em áreas contaminadas com cobre;
3. Quando cultivada em solos com altas concentrações de cobre, o genótipo “Vacaria” de aveia preta produz elevada quantidade de massa seca e acumula elevadas concentrações de cobre no sistema radicular, apresentando potencial para ser utilizada em programas de fitoestabilização de cobre;
4. As altas concentrações de Cu no solo influenciam a absorção de outros nutrientes pelos genótipos avaliados, porém este efeito é dependente do genótipo e do nutriente envolvido.

## LITERATURA CITADA

ACCIOLY, A.M.A. & SIQUEIRA, J.O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.,V.H. & SCHAEFER, C.E., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.299-352.

ANDREAZZA, R. Potencial de uso de bactérias e plantas para a remediação do cobre em áreas de viticultura e de rejeito de mineração de cobre no Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009. 125p. (Tese de Doutorado)

ANDREAZZA, R.; OKEKE, B.C.; LAMBAIS, M.R.; BORTOLON, L.; MELO, G.W.B. & CAMARGO, F.A.O. Bacterial stimulation of copper phytoaccumulation by bioaugmentation with rhizosphere bacteria. *Chemosphere*, 81:1149-1154, 2010.

ANDREAZZA, R.; BORTOLON, L.; PIENIZ, S.; GIACOMETTI, M.; ROEHRS, D.D.; LAMBAIS, M.R. & CAMARGO, F.O. Potential phytoextraction and phytostabilization of perennial peanut on copper-contaminated vineyard soils and copper mining waste. *Biol. Trace Elem. Res.* 143: 1729-1739, 2011.

BENAVIDES, M.P.; GALLEGO, S.M. & TOMARO, M.L. Cadmium toxicity in plants. *Braz. J. plant. Physiol.*, 17:21-34, 2005.

BERTI, W.R. & CUNNINGHAM, S.D. Phytostabilization of metals. In: RASKIN, I. & ENSLEY, B. D. (eds.). *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment*. New York, Wiley, 2000. p.71-88.

BOYD, R. S. The defense hypothesis of elemental hyperaccumulation: Status, challenges and new directions. *Plant Soil*, 293:153-176, 2007.

CASALI, C.A.; MORTELE, D.F.; RHEINHEIMER, D.S.; BRUNETO, G.; CORCINI, A.L.M.; KAMINSKI, J. & MELO, J.W.B. Formas e desorção de cobre em solos cultivados com videira na Serra Gaúcha do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1479-1487, 2008.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS-RS/SC. Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

FARIAS, J.G. Caracterização bioquímico-fisiológica de genótipos de batata (*Solanum tuberosum*) cultivados em solos com acúmulo de cobre. Santa Maria, RS. Universidade Federal de Santa Maria. 2012. 118p. (Dissertação de Mestrado)

FERREIRA, D. F. Programa de análises estatísticas (Statistical Analysis Software) e planejamento de experimentos. Lavras: UFLA, 2003.

GIROTTO, E. Alterações fisiológicas e bioquímicas em plantas cultivadas em solos com acúmulo de cobre e zinco. Santa Maria, RS. Universidade Federal de Santa Maria. 2010. 152p. (Tese de Doutorado)

KRÄMER, U.; PICKERING, I.J.; PRINCE, R.C.; RASKIN, I.L. & SALT, D.E. Subcellular localization and speciation of nickel in hyperaccumulator and non-accumulator *Thlaspi species*. Plant Physiol., 122:1343-1353, 2000.

KE, W.; XIONG, Z.T.; CHEN, S. & CHEN, J. Effects of copper and mineral nutrition on growth, copper accumulation and mineral element uptake in two *Rumex japonicus* populations from a copper mine and an uncontaminated field sites. Environ. Exp. Bot., 59:59-67, 2007.

LLORENS, N.; AROLA, L.; BLADÉ, C. & MAS, A. Effects of copper exposure upon nitrogen metabolism in tissue cultured *Vitis vinifera*. Plant Science, 160:159-163, 2000.

MANTOVANI, A. Composição química de solos contaminados por cobre: formas, sorção e efeito no desenvolvimento de espécies vegetais. Porto Alegre, RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. 165p. (Tese doutorado)

MARQUES, A.P.G.C.; RANGEL, A.O.S.S. & CASTRO, P.M.L. Remediation of heavy metal contaminated soils: phytoremediation as a potentially promising clean-up technology. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol., 39:622-654, 2009.

MARQUES, M.; AGUIAR, C.R.C. & SILVA, J.J.L.S. Desafios, técnicas e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. R Bras. Ci. Solo, 35:1-11, 2011.

MELO, R.F.; DIAS, L.E. ; MELLO, J.W.V. & OLIVEIRA, J.A. Potencial de quatro espécies herbáceas forrageiras para fitorremediação de solo contaminado por arsênio. R Bras. Ci. Solo, 33:455-465, 2009.

MENGEL, K. & KIRKBY, E.A. Principles of plant nutrition. 4.ed. Bern: International Potash Institute, 1987. 687p.

MONNI, S.; SALEMAA, M.; WHITE, C.; TUITTILA, E. & HUOPALAINEN, M. copper resistance of *Calluna vulgaris* originating from the pollution gradient of a Cu-Ni smelter, in southwest Finland. Environ. Poll., 109:211-219, 2000.

NACHIGALL, G.R et al. Formas de cobre em solos de vinhedos em função do pH e da adição de cama-de-frango. Pesq. Agropec. Bras., 42:427-434, 2007.

PANOU-FILOTHEOU, H.; BOSABALIDIS, A.M. & KARATAGLIS, S. Effects of copper toxicity on leaves of oregano (*Origanum vulgare* subsp. hirtum). Ann. of botany, 88:207-214, 2001.

QIAN, M.; LI, X. & SHEN, Z. Adaptive copper tolerance in *Elsholtzia haichowensis* involves the production of Cu-induced thiol peptides. Plant Growth Regulation, 47:65-73, 2005.

SANTOS, H. P.; MELO, J.W.B.; LUZ, N.B. & TOMASI, R.J. Comportamento fisiológico de plantas de aveia (*Avena strigosa*) em solos com excesso de cobre. Bento Gonçalves: Embrapa, 2004 (Comunicado Técnico 49).

SANTOS, G.C.G.; RODELLA, A.A.; ABREU, C.A. & COSCIONE, A.R. Vegetable species for phytoextraction of boron, copper, lead, manganese and zinc from contaminated soil. Sci. Agric., 67: 713-119, 2010.

SANTIBÁÑEZ, C.; VERDUGO, C. & GINOCCHIO, R. Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: Implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*. *Sci. Total Environ.*, 395:1-10, 2008.

SILVA, F.C. (Org.). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília: EMBRAPA. Embrapa Informação Tecnológica, 1999. 627p.

TAVARES, T.M. & CARVALHO, F.M. Avaliação de exposição de populações humanas a metais pesados no ambiente: exemplos do recôncavo Baiano. *Química Nova*, 15:147-154, 1992.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A, BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análises de solo, planta e outros materiais. 2. ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

XIA, Y. & SHEN; G. Comparative studies of copper tolerance and uptake by three plant species of the *Genus Elsholtzia*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 79:53-57, 2007.

WEBER, M.B.; SCHAT, H. & TEN BOOKMUN-VAN DER MAAREL, W.M. The effect of copper toxicity on the contents of nitrogen compounds in *Silene vulgaris* (Moench) Garcke. *Plant and Soil*, 133:101-109, 1991.

YOON, J.; CAO, X & ZHOU Q. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Sci. Total Environ.*, 368:456–464, 2006.

YRUELA, I. Copper in plants. *Braz. J. Plant Physiol.*, 17:145-146, 2005.

ZANCHETA, A.C.F.; ABREU, C.A.; ZAMBROSI, F.C.B.; ERISMANN, N.M. & LAGÔA, A.M.M.A. Fitoextração de cobre por espécies de plantas cultivadas em solução nutritiva. *Bragantia*, 70:737-744, 2011.

## SELEÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA PARA FITORREMEDIAÇÃO DO COBRE EM SOLO DA SERRA GAÚCHA

Resumo - O objetivo deste trabalho foi selecionar plantas de cobertura de solo de estação quente, promissoras para fitoextração e fitoestabilização em solos contaminados com cobre. Um Cambissolo foi contaminado com doses de cobre de 0, 100, 200, 400, 500 e 600 mg kg<sup>-1</sup> de solo. Neste foram cultivadas, em casa de vegetação nove espécies de plantas: milho (*Pennisetum glaucum* L.), feijão de porco (*Canavalia ensiformis* DC.), mucuna preta (*Mucuna aterrima* L.), feijão guandu anão (*Cajanus cajan* L.), pensacola (*Paspalum notatum* L.), (crotalaria (*Crotalaria juncea* L.), mucuna cinza (*Mucuna cinereum* L.), labe-labe (*Dolichos lablad* L.) e crotalaria (*Crotalaria spectabilis* Roth.). Aos 90 dias após a semeadura, as plantas foram avaliadas quanto à produção de massa seca de parte aérea e raiz, teores de Cu, P, K, Ca, Fe, Zn e N na parte aérea e de Cu nas raízes. O feijão de porco produz elevada quantidade de massa seca e acumula elevadas concentrações de cobre na parte aérea, apresentando potencial para ser utilizada em programas de fitoextração de cobre. A mucuna preta e a mucuna cinza produzem elevadas quantidades de massa seca e acumulam elevadas concentrações de cobre no sistema radicular, apresentando potencial para ser utilizada em programas de fitoestabilização de cobre.

Termos para indexação: Viticultura, metal pesado, poluição do solo, fitoestabilização, fitoextração.



## SELECTION OF SUMMER COVERAGE PLANTS FOR PHYTOREMEDIATION OF CUPRUM IN MONTAIN RANGE GAUCHA

Abstract - The aim of this work was to select warm season cover soil plants, promising for phytoextraction and phytostabilizing in soils contaminated with copper. A ‘Cambissolo’ was contaminated with copper dosage of 0, 100, 200, 400, 500 and 600 mg kg<sup>-1</sup> of soil. In this soil were grown in a greenhouse nine plant species: (*Pennisetum glaucum* L.), (*Canavalia ensiformis* DC.), (*Mucuna aterrima* L.), (*Cajanus cajan* L.), (*Paspalum notatum* L.), (*Crotalaria juncea* L.), (*Mucuna cinereum* L.), (*Dolichos lablad* L.) and (*Cortalaria spectabilis* Roth). At 90 days after sowing, plants were evaluated for dry matter production of shoot and root, levels of Cu, P, K, Ca, Fe, Zn and in shoot areas N and Cu in the roots, and were calculated Bioaccumulation Factor Index and Transfer of Cu in these plants. The jack bean produces high amount of dry and accumulate high concentrations of copper in shoots, with potential to be used in programs for phytoextraction of copper. The black mucuna bean and gray mucuna produce high amounts of dry matter and accumulate high concentrations of copper in the root system, with potential to be used in programs phytostabilization of copper.

Index terms: Viticulture, heavy metal, pollution of the soil, phytostabilization, phytoextraction.

### Introdução

A Serra Gaúcha é a principal região vitivinícola do Brasil. Esta atividade teve início com a chegada dos imigrantes italianos, a partir dos anos de 1860, que desde então utilizam da calda bordalesa, suspensão coloidal aquosa obtida pela mistura de sulfato de cobre e hidróxido de cálcio, no controle de doenças fúngicas, como míldio e oídio (Andreazza, 2009).

Devido ao clima úmido da região, a incidência destas doenças é alta, o que faz com que sejam realizadas até 10 aplicações de calda bordalesa por ano. A grande maioria da calda aspergida nas folhas das videiras tem como destino o solo, devido ao escoamento pela água de chuva ou a senescência das folhas, o que resulta na adição de até 30 kg ha<sup>-1</sup> ano de cobre no solo (Nachigall et al., 2007; Casali et al., 2008). Estudos nestes solos indicam que as concentrações de cobre total no horizonte superficial são muito elevadas, podendo atingir valores tão altos quanto 718 mg kg<sup>-1</sup>, sendo que a concentração natural situa-se entre 40 e 50 mg kg<sup>-1</sup> (Mantovani, 2009).

O cobre é um micronutriente que atua como componente de várias enzimas e coenzimas, além de participar da fotossíntese, da respiração e do metabolismo do nitrogênio e dos carboidratos (Yruela, 2009; Zancheta et al., 2011). No entanto, quando em altas concentrações no solo, pode ser absorvido em grande quantidade pelas plantas causando diversos efeitos negativos como a redução do crescimento de parte aérea e sistema radicular, resultando em perdas consideráveis para o potencial produtivo das plantas (Santos et al., 2004; Girotto, 2010).

A presença de altos teores do cobre na camada superficial nos solos de vinhedos da Serra Gaúcha reduz ou impede o desenvolvimento de plantas herbáceas espontâneas ou introduzidas que normalmente são cultivadas nas entre linhas ou no período em que as videiras estão sem ou com poucas folhas (Santos et al., 2004; Andreazza, 2009). Na ausência da cobertura vegetal o transporte de partículas via escoamento superficial é potencializado e a transferência do cobre para as águas superficiais pode ocorrer, assim como sua percolação no perfil do solo, uma vez que na ausência de raízes não há possibilidade de absorção e ciclagem do cobre no sistema solo-planta.

Diante deste cenário, alternativas para a remediação destes solos devem ser estudadas visando reduzir o risco de contaminação do solo e das águas superficiais e subsuperficiais

com o cobre. A fitorremediação utiliza plantas para remover contaminantes do solo, com custo razoável, baixo impacto ambiental e grande aceitação pública (Nascimento, 2009). Sob o termo fitorremediação existem diferentes técnicas com objetivos específicos, destacando-se a fitoextração que consiste na extração do metal do solo e acúmulo, preferencialmente, na parte aérea da planta (Nascimento & Xing, 2006) e a fitoestabilização, que baseia-se na capacidade das plantas em estabilizar o metal no solo, através do sistema radicular, reduzindo assim a movimentação por erosão e percolação no solo (Wong, 2003).

Tendo em vista este grave problema ambiental causado pela contaminação dos solos de vinhedos da Serra Gaúcha por cobre, a enorme diversidade vegetal do Brasil, e o reduzido número de estudos que avaliaram a capacidade de plantas de cobertura do solo em fitoextrair ou fitoestabilizar o cobre, o objetivo deste trabalho foi selecionar plantas de cobertura de solo de verão, para fitoextração e fitoestabilização do cobre em um solo da Serra Gaúcha contaminado com cobre.

### **Material e Métodos**

Um Cambissolo Húmico, um dos principais solos destinados ao cultivo das videiras na Região da Serra Gaúcha, foi coletado na profundidade de 0 a 20 cm em uma área da Embrapa Uva e Vinho (Bento Gonçalves/RS), sem histórico de cultivo e de aplicação de calda bordalesa. As análises físico-químicas deste solo foram realizadas conforme Silva (1999) e resultaram nas seguintes características: argila, 500 g kg<sup>-1</sup>; matéria orgânica, 35 g kg<sup>-1</sup>; pH(água 1:1), 4,0; P(Mehlich-1), 3,7 mg dm<sup>-3</sup>; K(Mehlich-1), 92,0 mg dm<sup>-3</sup>; Cu(Mehlich-1), 2,9 mg dm<sup>-3</sup>; Zn(Mehlich-1), 3,3 mg dm<sup>-3</sup>; Saturação de bases, 9,0%; H+Al, 30,7 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>; Saturação com alumínio, 60,5%.

Após o solo ter sido seco e peneirado, foi realizado a correção de pH, com a adição de

hidróxido de cálcio e óxido de magnésio na proporção molar de Ca e Mg de 2:1, para elevar o pH a 5,5 e o solo foi incubado com umidade de 80% da capacidade de campo por um período de 60 dias. Posteriormente foi realizada a adição de fósforo e potássio de forma que seus teores nesse solo fossem elevados ao nível alto, com a adição de 47 mg kg<sup>-1</sup> de P e 60 mg kg<sup>-1</sup> de K. Em seguida, foi realizada a contaminação do solo com doses crescentes de cobre (0, 100, 200, 400, 500 e 600 mg kg<sup>-1</sup> de solo), na forma de solução aquosa de cloreto de cobre (66,66%) e sulfato de cobre (33,34%), sendo utilizada a dose de 0 mg kg<sup>-1</sup> como testemunha. Antes do cultivo, com o pH do solo de 5,2, foram determinados os teores disponíveis de cobre pelos de Melich-1 (Tedesco et al., 1995), HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup> (Tedesco et al., 1995) e Na<sub>2</sub>-EDTA 0,01 mol L<sup>-1</sup>/acetato de amônio 1,0 mol L<sup>-1</sup> (Chaignon et al., 2009).

Dois cultivos foram realizados na casa de vegetação, o primeiro no período de outubro de 2011 a janeiro de 2012 e segundo de janeiro de 2012 a abril de 2012. O primeiro experimento constituiu-se de 40 tratamentos, em esquema fatorial 4 x 10, com quatro doses de cobre (0, 100, 200 e 400 mg de cobre por kg de solo) e nove genótipos de plantas mais o solo controle sem cultivo das plantas, dispostos em delineamento inteiramente casualizado, com 3 repetições, totalizando 120 unidades experimentais. Os nove genótipos avaliados foram: milho (*Pennisetum glaucum* L.), feijão de porco (*Canavalia ensiformis* DC.), mucuna preta (*Mucuna aterrima* L.), feijão guandu anão (*Cajanus cajan* L.), pensacola (*Paspalum notatum* L.), (crotalaria (*Crotalaria juncea* L.), mucuna cinza (*Mucuna cinereum* L.), labe-labe (*Dolichos lablad* L.) e crotalaria (*Crotalaria spectabilis* Roth.). No segundo experimento foram selecionadas as três plantas que apresentaram o melhor crescimento e pouco ou nenhum sintoma de toxicidade de Cu no primeiro experimento (feijão de porco, mucuna cinza e mucuna preta) e cultivadas nas doses de 0, 400, 500 e 600 mg kg<sup>-1</sup> de Cu no mesmo solo e nas mesmas condições do primeiro experimento, constituindo-se 16 tratamentos, em esquema fatorial 4 x 3, com quatro doses de cobre e três genótipos de plantas mais o solo controle sem

cultivo das plantas, dispostos em delineamento inteiramente casualizado, com 3 repetições, totalizando 36 unidades experimentais.

As sementes das plantas leguminosas foram inoculadas com inoculante específico para cada cultura e as gramíneas receberam adubação mineral de N na semeadura e mais uma aplicação em cobertura, sendo que em cada aplicação foi utilizado uma quantidade de N equivalente a  $20 \text{ kg ha}^{-1}$ . Vasos plásticos com capacidade de cinco litros foram preenchidos com quatro kg de solo. Em cada vaso foi colocado nove sementes de cada genótipo de planta, sendo realizado o desbaste dessas plantas oito dias após a emergência, deixando-se três plantas por vaso até o final de cada experimento.

Noventa dias após a semeadura as plantas foram colhidas, cortando-se a parte aérea rente ao solo. As raízes foram separadas do solo manualmente e lavadas em água corrente, EDTA  $0,02 \text{ mol L}^{-1}$  e água destilada, respectivamente. Para determinar a quantidade de massa seca, a parte aérea e as raízes foram secas em estufa com circulação forçada de ar, a  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  até peso constante.

Para determinar o teor de cobre na parte aérea e raiz das plantas, amostras de tecido seco e triturado foram submetidas à digestão nítrico-perclórica (Embrapa, 1999). A determinação da quantidade do metal foi realizada em um espectrofotômetro de absorção atômica (GBC, 932 AA, Austrália). Além do cobre, na parte aérea das plantas foi determinada a concentração de P, K, Ca, Fe, Zn e N (Tedesco et al., 1995).

Foram calculados o Fator de Bioacumulação (FB), obtido pela divisão entre a concentração do cobre na parte aérea da planta e a concentração do cobre disponível no solo, extraído pelo método Melich-1 e o Índice de Transferência (IT) obtido pela divisão entre a concentração do elemento na parte aérea e a concentração do cobre do sistema radicular.

Os dados foram submetidos a análise de variância, por meio do uso do programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2003), e as equações de regressão foram determinadas pelo melhor

ajuste, por meio do programa Table Curve 2D for Windows v. 5.01 (SYSTAT Software Inc). Posteriormente, correlações de Pearson foram calculadas entre as concentrações de Cu e P, K, Ca, Fe, Zn e N na parte aérea das culturas testadas.

## Resultados e Discussão

A adição de doses de cobre ao solo de 0, 100, 200, 400, 500 e 600 mg kg<sup>-1</sup> na forma de solução aquosa de cloreto de cobre (66,66%) e sulfato de cobre (33,34%) resultou em teores disponíveis de 0,94; 35,79; 58,60; 166,14; 198,69 e 232,11 mg kg<sup>-1</sup> de Cu extraído por Melich-1, de 1,16; 47,95; 72,29; 218,83; 260,02 e 304,67 mg kg<sup>-1</sup> de Cu extraído por HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup> e de 12,14; 95,56; 136,03; 324,23; 386,46 e 452,28 mg kg<sup>-1</sup> extraído por Na<sub>2</sub>-EDTA 0,01 mol L<sup>-1</sup>/acetato de amônio 1,0 mol L<sup>-1</sup>. A relação linear entre Cu aplicado e Cu disponível no solo foi de  $y=0,402x - 5,36$  ( $R^2=0,99$ ) para o extrator Melich-1,  $y=0,53x - 7,88$  ( $R^2=0,98$ ) para o HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup> e  $y=0,75x + 10,48$  ( $R^2=0,99$ ) para o Cu extraído com Na<sub>2</sub>EDTA 0,01 mol L<sup>-1</sup>. Valores semelhantes a esses são encontrados em solos de vinhedos em produção da Serra Gaúcha. Mantovani (2009) estudando solos com cultivos de videiras a mais 40 anos na Serra Gaúcha encontrou valores de Cu-extraível com solução HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup> de aproximadamente 160 e 225 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, para Cambissolo e Neossolo na camada de 0-20 cm de profundidade. Girotto (2010) também em solos de vinhedos da Serra Gaúcha classificados como Cambissolos, encontrou valores de cobre de 95,7 a 328,7 mg kg<sup>-1</sup> de Cu, extraído por Na<sub>2</sub>-EDTA 0,01 mol L<sup>-1</sup>/acetato de amônio 1,0 mol L<sup>-1</sup>.

Os três métodos de determinação dos teores de cobre disponíveis no solo, apresentaram valores elevados de correlação em relação à quantidade de cobre disponível no solo com a acumulada na parte aérea das plantas de feijão de porco, mucuna cinza e mucuna

preta (Figura 1). Borges & Coutinho (2004) observaram que o Cu extraído pelos métodos de HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup>, Melich-1 e Melich-3, relacionaram-se significativamente com os teores de cobre acumulados na parte aérea de plantas de milho. Portanto, percebe-se que o método utilizado para extração do Cu disponível no solo não exerce grande influência nos resultados.

Houve redução na produção de massa seca, tanto de parte aérea (MSPA) como de sistema radicular (MSSR), para todas as culturas com o aumento das doses de Cu aplicadas ao solo. No experimento 1, na dose de 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup> a maioria das plantas estudadas apresentaram valores de produção MSPA semelhantes ao comportamento apresentado no tratamento testemunha, as plantas de milho, feijão de porco, mucuna cinza e mucuna preta foram as que produziram as maiores quantidades de MSPA, com destaque para o milho que produziu, respectivamente, 45,31 e 41,04 g vaso<sup>-1</sup> nas dosagens de 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 2). Já na dose de 400 mg kg<sup>-1</sup> as plantas apresentaram acentuada redução na MSPA, com exceção da mucuna preta que reduziu apenas em aproximadamente 20% MSPA em relação a testemunha, produzindo 26,02 g vaso<sup>-1</sup> na maior dose. No experimento 2, onde as doses de Cu adicionadas foram superiores, as plantas reduziram drasticamente sua produção de MSPA em todas as doses, sendo o feijão de porco a planta que obteve os melhores resultados com redução de 65,5 % na dose de 600 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto que a mucuna preta e mucuna cinza tiveram redução de 75,17% e 73,31%, respectivamente (Figura 3). Os resultados encontrados demonstram que existe grande variação entre as diferentes plantas testadas em relação à tolerância a altas concentrações de cobre no solo, o que está associado a diferentes mecanismos de tolerância como, por exemplo, ao nível de atividade das enzimas que atuam na desintoxicação de radicais livres, redução da toxicidade do metal após quelação por compostos orgânicos e/ou compartimentalização no vacúolo (Qian et al., 2005; Zanqueta et al., 2011).

O efeito do Cu na produção de MSSR foi semelhante ao encontrado na MSPA com reduções drásticas onde foram adicionadas as maiores doses de Cu. No experimento 1, nas doses de 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup> todas as plantas apresentaram comportamento semelhante a testemunha, a cultura do milho foi a que produziu as maiores quantidades de MSSR com 18,92 e 17,57 g vaso<sup>-1</sup>, respectivamente, nas doses de 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup>. Já na dose 400 mg kg<sup>-1</sup> as plantas que obtiveram melhor desempenho foram as mucunas preta e cinza, que produziram, respectivamente, 8,97 e 5,12 g vaso<sup>-1</sup> de MSSR (Figura 2). Confirmando esses resultados no experimento 2 a mucuna preta também apresentou maior produção MSSR na dose de Cu de 600 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 3). Os resultados estão de acordo com os encontrados por Zancheta et al. (2011), que cultivaram em solução nutritiva contaminada com cobre plantas de milho, sorgo, feijão de porco e crotalária, e observaram grande redução na MSPA e MSSR nas doses mais elevadas do contaminante em todas espécies.

As variações que ocorrem na produção de massa seca estão relacionadas às altas concentrações de Cu no solo, que proporciona alterações, em níveis bioquímicos e fisiológicos (Santos et al., 2004). O Cu embora seja um micronutriente essencial para o crescimento das plantas, possuindo funções importantes em vários processos fisiológicos, quando em altas concentrações no solo pode ser absorvido em maior quantidade pelas plantas, sendo tóxico e causando efeitos negativos como na redução do crescimento da parte aérea e do sistema radicular (Bravin et al., 2010; Girotto, 2010).

As concentrações de Cu acumulados no tecido das plantas aumentaram com o aumento das dosagens adicionadas ao solo, com valores mais elevados no sistema radicular (Tabela 1 e Figura 4). O feijão guandu anão foi a planta que mais acumulou cobre na parte aérea no experimento 1 (Tabela 1), já no 2º experimento quem teve maior destaque foi o feijão de porco, que acumulou 144,37 mg kg<sup>-1</sup> na dose 600 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 4), podendo ser considerada uma planta acumuladora de Cu, que segundo Boyd (2007) é aquela que concentra mais de 100



mg kg<sup>-1</sup> na parte aérea, além disso considerando uma produção de MS de 1912,5 kg ha<sup>-1</sup> a cultura do feijão de porco extrairia aproximadamente 280 g ha<sup>-1</sup> em um ciclo de cultivo. Já em relação ao acúmulo de cobre no sistema radicular, no primeiro experimento, a mucuna cinza e o labe-labe concentraram grande quantidade de Cu no sistema radicular, destacando das demais. No experimento 2 a mucuna cinza e mucuna preta acumularam, 1766,4 e 1356,9 mg kg<sup>-1</sup> na maior dose, respectivamente. Como isto, percebe-se que em todas as plantas testadas a concentração de Cu é muito maior no sistema radicular em relação à parte aérea, isso evidencia que algumas espécies de plantas possuem em seu sistema radicular mecanismos que podem impedir ou reduzir a translocação de Cu de parte do excedente de Cu absorvido para a parte aérea das plantas (Cornu et al., 2007).

As plantas de feijão guandu anão e feijão de porco, que concentram quantidade considerável de Cu na sua parte aérea, são plantas que apresentam potencial para serem usadas em programas de fitorremediação com enfoque para a fitoextração. Zancheta et al. (2011) trabalhando com feijão de porco em solos com doses crescente de Cu, relatam seu potencial fitoextrator.

Por outro lado, as plantas de mucuna preta, mucuna cinza e labe-labe apresentam grande potencial para serem usadas como fitoestabilizadoras, pois foram capazes de acumular grande quantidade de Cu nos seus sistemas radiculares. Chaves et al. (2010) observaram incremento de 265% e 4379%, respectivamente, para folhas e raízes em doses de Cu adicionadas de 100 mg kg<sup>-1</sup> em relação a testemunha, para a cultura da mamona, comprovando a tendência do Cu acumular-se preferencialmente no sistema radicular como foi verificado neste estudo. Além disso, as plantas de mucuna preta, mucuna cinza e labe-labe apresentaram bom desenvolvimento em doses elevadas de Cu mostrando possuírem boa capacidade de tolerar altas concentrações do metal no solo, características fundamentais para plantas

fitoestabilizadoras, que normalmente são utilizadas em locais onde o solo está tão contaminado que a fitoextração não é uma abordagem adequada (Marques et al., 2011).

O Fator de Bioacumulação (FB) evidencia a capacidade das plantas em absorver o metal disponível no solo. No experimento 1 os valores dos fatores de bioacumulação variaram de 0,09 a 17,70 (Tabela 2). A *Crotalaria spectabilis* e *Crotalaria juncea* apresentaram os maiores valores de FB nas doses de 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Já na dose de 400 mg kg<sup>-1</sup> destacou-se o feijão guandú, mostrando possuir maior habilidade que as outras plantas em acumular o Cu na parte aérea em doses elevadas de Cu no solo. No experimento 2 os valores variaram de 0,24 a 23,81 (Tabela 2) destacando-se a cultura de feijão de porco que apresentou os maiores valores de FB em todos os tratamentos onde o cobre foi adicionado ao solo. Resultados semelhantes foram encontrados destacam a capacidade das culturas de feijão guandu e feijão de porco em acumular grande quantidade de cobre na parte aérea em relação as quantidades disponíveis no solo, principalmente em solos contaminados com altas concentrações de cobre. Dias et al. (2010) destacaram a capacidade bioacumuladora do feijão guandú em solo contaminado com arsênio. Branzini et al. (2012) enfatiza que o FB é um índice chave para avaliar a eficiência de acumulação de metais em plantas e que a absorção e acumulação de metais pesados nas plantas dependem de vários fatores, dentre eles, a disponibilidade de metais no solo e necessidade fisiológica das plantas pelos metais.

Os índices de transferência (IT) de Cu variaram de 0,03 a 0,75 no primeiro experimento, com valores mais elevados para a cultura do feijão guandu em todas as doses de cobre (Tabela 2). Já no experimento 2 os valores variaram de 0,05 a 1,02 com destaque para o feijão de porco, que apresentou valores bem superiores as demais culturas (Tabela 2). Os resultados encontrados sugerem que as plantas de feijão guandu e feijão de porco, respectivamente, nos experimentos 1 e 2, nas maiores doses de Cu, possuem também maior capacidade em translocar o metal do sistema radicular para a parte aérea. Dias et al. (2010) encontrou de 83,8

a 91,9% para o IT do feijão guandu em solo contaminado com As, confirmando os resultados encontrados neste experimento. Já Romeiro et al. (2005) estudando a cultura do feijão de porco em solo contaminado com Pb, verificaram que a espécie foi eficiente na translocação do metal para a parte aérea, concluindo que a espécie tem potencial para ser utilizada como fitoextratora. No entanto, apesar destas plantas terem apresentado valores de IT altos em relação às demais plantas avaliadas nesse estudo (Tabela 2), os resultados demonstram haver alguma restrição na translocação de Cu para a parte aérea, já que somente valores superiores a 1,0 são considerados elevados (Yoon et al., 2006).

Altas concentrações de Cu no ambiente radicular prejudicam o crescimento e desenvolvimento de plantas, o que também pode estar relacionado ao comprometimento na absorção e metabolismo de nutrientes (Llorens et al., 2000). No primeiro experimento houve correlação negativa entre Cu e o P para a maioria das plantas, não sendo significativa somente no labe-labe e o milheto (Tabela 3). No segundo experimento, o Cu se correlacionou significativamente com o P, mas com o K e Ca não houve correlação significativa para as três culturas (Tabela 3). Além disto, o Fe teve correlação significativa apenas com a cultura do feijão de porco.

Os resultados demonstram que as altas concentrações de Cu no solo influenciam a absorção de outros nutrientes pelas plantas de cobertura de verão avaliadas, porém este efeito é dependente do genótipo e do nutriente (Monni et al., 2000). Em estudo realizado por Andrezza (2009) o autor observou aumento na absorção de N, P, K, Ca, Zn e Fe em solo de vinhedos contaminados com Cu, na cultura da aveia preta. Já em estudo realizado por Ke et al. (2007) ocorreu o oposto, plantas de *Rumex japonicus* cultivadas em solo contaminado com cobre reduziram a absorção de P e Fe, apesar de ter aumentado a concentração de Ca nos tecidos da parte aérea. Exemplificando ainda mais essa grande variação de resultados observada na literatura, Zancheta et al. (2011) encontrou, em solo contaminado com cobre

correlações negativas para Zn e Ca na cultura do sorgo e para Ca e Fe em feijão de porco. Esses resultados, de certo modo, reforçam os resultados encontrados no presente estudo, em que altas concentrações de cobre no solo além de interferir na absorção de nutrientes, podem interferir no transporte dos nutrientes essenciais às plantas e assim provocar distúrbios na composição nutricional destas (Monni et al., 2000; Ke et al., 2007).

### **Conclusões**

1. As plantas de feijão de porco produzem elevada quantidade de massa seca e acumulam altas concentrações de cobre na parte aérea, apresentando potencial para ser utilizada em programas de fitoextração de cobre;
2. As plantas mucuna preta e a mucuna cinza produzem elevadas quantidades de massa seca e acumulam elevadas concentrações de cobre no sistema radicular, apresentando potencial para ser utilizada em programas de fitoestabilização de cobre;
3. As altas concentrações de Cu no solo influenciam a absorção de outros nutrientes pelas plantas de cobertura de verão avaliadas, porém este efeito é dependente do genótipo e do nutriente envolvido.

## Referências

- ANDREAZZA, R. **Potencial de uso de bactérias e plantas para a remediação do cobre em áreas de viticultura e de rejeito de mineração de cobre no Rio Grande do Sul**. 2009. 125p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ARIAS, M.; LÓPEZ, E.; FERNÁNDEZ, D. & SOTO, B. Copper distribution and dynamics in acid vineyard soils treated with copper-based fungicides. **Soil Science**, v.169 p. 796-805, 2004.
- BORGES, M.R. & COUTINHO, E.L.M. Metais pesados do solo após aplicação de biossólido. II – disponibilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28 p.557-568, 2004.
- BRANZINI, A.; GONZALÉZ, R.S. & ZUBILLAGA, M. Absorption and translocation of copper, zinc and chromium by *Sesbania virgata*. **Journal of Environmental Management**. V.102 p.50-54, 2012.
- BRAVIN, M.N.; LE MERRER, B.; DENAIX, L.; SCHNEIDER, A. & HINSINGER, P. Copper uptake kinetics in hydroponically-grown durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) as compared with soil's ability to supply copper. **Plant and Soil**, v.331 p.91-104, 2010.
- CASALI, C.A.; MORTELE, D.F.; RHEINHEIMER, D.S.; BRUNETO, G.; CORCINI, A.L.M.; KAMINSKI, J. & MELO, J.W.B. Formas e dessorção de cobre em solos cultivados com videira na Serra Gaúcha do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32 p.1479-1487, 2008.
- CHAIGNON, V.; QUESNOIT, M.; HINSINGER, P. Copper availability and bioavailability are controlled by rhizosphere pH in rape grown in an acidic Cu-contaminated soil. **Environmental Pollution**, v.157 p.3363-3369, 2009.

CHAVES, L.H.G.; MESQUITA, E.F.; ARAUJO, D.L. & FRANÇA, C.P. Acúmulo e distribuição de cobre e zinco em mamoneira cultivar BRS Paraguaçu e crescimento da planta.

**Engenharia Ambiental**, v.7 p.263-277, 2010.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

CORNU, J.Y.; STAUNTON, S.; HINSINGER, P. Copper concentration in plants and in the rhizosphere as influenced by the iron status of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). **Plant and Soil**, v.292 p.63-77, 2007.

DIAS, L.E; MELO, R.F.; MELLO, J.W.V.; OLIVEIRA, J.A. & DANIELS, W.L. Growth of seedlings of pigeon pea (*Cajanus cajan* (L.) MILLSP), wand riverhemp (*Sesbania virgata* (CAV.) PERS.), and lead tree (*Leucaena leucocephala* (LAM). DE WIT) in an arsenic-contaminated soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. V.34 p.975-983, 2010.

FERREIRA, D. F. **Programa de análises estatísticas (Statistical Analysis Software) e planejamento de experimentos**. Lavras: UFLA, 2003.

GIROTTI, E. **Alterações fisiológicas e bioquímicas em plantas cultivadas em solos com acúmulo de cobre e zinco**. 2010. 152p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

KE, W.; XIONG, Z.T.; CHEN, S. & CHEN, J. Effects of copper and mineral nutrition on growth, copper accumulation and mineral element uptake in two *Rumex japonicus* populations from a copper mine and an uncontaminated field sites. **Environmental and Experimental Botany**, v.59 p.59-67, 2007.

LLORENS, N.; AROLA, L.; BLADÉ, C. & MAS, A. Effects of copper exposure upon nitrogen metabolism in tissue cultured *Vitis vinifera*. **Plant Science**, v.160 p.159-163, 2000.

- MANTOVANI, A. **Composição química de solos contaminados por cobre: formas, sorção e efeito no desenvolvimento de espécies vegetais**. 2009. 165p. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MARQUES, M.; AGUIAR, C.R.C. & SILVA, J.J.L.S. Desafios, técnicas e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35 p.1-11, 2011.
- MONNI, S.; SALEMAA, M.; WHITE, C.; TUITTILA, E. & HUOPALAINEN, M. copper resistance of *Calluna vulgaris* originating from the pollution gradient of a Cu-Ni smelter, in southwest Finland. **Environmental Pollution**, v.109 p.211-219, 2000.
- NACHIGALL, G.R et al. Formas de cobre em solos de vinhedos em função do pH e da adição de cama-de-frango. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v.42 p.427-434, 2007.
- NASCIMENTO, C.W.A.; RIBEIRO, M.R.; FILHO, M.R.R. & CANTALICE, J.R.B. Fitoextração de metais pesados em solos contaminados: avanços e perspectivas. **Tópicos em Ciência do Solo**. V.6 p.461-4495, 2009.
- NASCIMENTO, C.W.A. & XING, B. Phytoextraction: a review on enhanced metal availability and plant accumulation. **Scientia Agricola**, v.63 p.299-311, 2006.
- QIAN, M.; LI, X. & SHEN, Z. Adaptive copper tolerance in *Elsholtzia haichowensis* involves the production of Cu-induced thiol peptides. **Plant Growth Regulation**, v.47 p.65-73, 2005.
- ROMEIRO, S.; LAGÔA, A.M.M.A.; FURLANI, P.R.; ABREU, C.A. & PEREIRA, B.F.F. Absorção de chumbo e potencial de fitorremediação de *Canavalia ensiformes* L. **Bragantia**, v.66 p.327-334, 2007.
- SANTOS, H.P.; MELO, G.W.B.; LUZ, N.B. & TOMASI, R.J. **Comportamento fisiológico de plantas de aveia (*Avena strigosa*) em solos com excesso de cobre**. Bento Gonçalves, Embrapa, 2004. 11p. (Comunicado Técnico 49).

SILVA, F.C. (Org.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2.ed. Brasília: EMBRAPA. Embrapa Informação Tecnológica, 1999. 627p.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A, BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. **Análises de solo, planta e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

WONG, M. W. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. **Chemosphere**, v.50 p.775-780, 2003.

YRUELA, I. Copper in plants: acquisition, transport and interactions. **Functional Plant Biology**, v.36 p.409-430, 2009.

ZANCHETA, A.C.F.; ABREU, C.A.; ZAMBROSI, F.C.B.; ERISMANN, N.M. & LAGÔA, A.M.M.A. Fitoextração de cobre por espécies de plantas cultivadas em solução nutritiva. **Bragantia**, v.70 p.737-744, 2011.



**Tabela 1.** Concentração de Cu ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) na parte aérea e sistema radicular de nove plantas de cobertura de solo de verão: milho (*Pennisetum glaucum* L.), feijão de porco (*Canavalia ensiformis* DC.), mucuna preta (*Mucuna aterrima* L.), feijão guandu anão (*Cajanus cajan* L.), pensacola (*Paspalum notatum* L.), (crotalaria (*Crotalaria juncea* L.), mucuna cinza (*Mucuna cinereum* L.), labe-labe (*Dolichos lablad* L.) e crotalaria (*Crotalaria spectabilis* Roth.) em solo contaminado com 0, 100, 200 e 400  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cobre.

Espécies	Concentração de Cu na parte aérea				Concentração de Cu no sistema radicular			
	0	100	200	400	0	100	200	400
<b>Milheto</b>	4,33 e	6,66 h	7,70 g	27,66 e	26,92 b	105,21 b	162,16 d	ND
<b>F. de Porco</b>	7,22 d	8,48 f	10,20 f	14,74 f	24,85 b	105,87 b	136,69 f	226,89 g
<b>Mucuna preta</b>	14,91 b	18,76 b	20,15 b	31,75 c	27,03 b	236,51 a	277,72 b	685,92 c
<b>F. Guandu</b>	12,99 c	17,32 c	19,96 b	51,96 a	18,23 b	54,05 e	73,31 g	361,60 d
<b>Pensacola</b>	11,55 c	15,64 d	17,80 d	29,20 d	27,56 b	111,88 b	149,32 e	324,32 e
<b>C. Juncea</b>	15,15 b	16,43 d	22,13 a	28,87 d	23,82 b	81,18 d	160,30 d	272,19 f
<b>Mucuna cinza</b>	16,41 a	18,46 b	19,82 b	27,90 e	51,57 a	247,90 a	333,02 a	798,99 a
<b>Labe-labe</b>	10,88 c	12,69 e	15,82 e	28,09 e	50,95 a	81,39 d	195,09 c	782,66 b
<b>C. spectabilis</b>	14,91 b	20,69 a	19,24 b	33,44 b	19,88 b	94,42 c	184,13 c	335,50 e

Letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-knot ( $p < 0,05$ ). ND: não determinado.

**Tabela 2:** Fator de bioacumulação e índice de transferência de nove plantas de cobertura de solo de verão: milho (*Pennisetum glaucum* L.), feijão de porco (*Canavalia ensiformis* DC.), mucuna preta (*Mucuna aterrima* L.), feijão guandu anão (*Cajanus cajan* L.), pensacola (*Paspalum notatum* L.), crotalaria (*Crotalaria juncea* L.), mucuna cinza (*Mucuna cinereum* L.), labe-labe (*Dolichos lablad* L.) e crotalaria (*Crotalaria spectabilis* Roth.), e em solo contaminado com 0, 100, 200 e 400 mg kg<sup>-1</sup> de cobre no primeiro experimento e com 0, 400, 500 e 600 mg kg<sup>-1</sup> de cobre no segundo experimento.

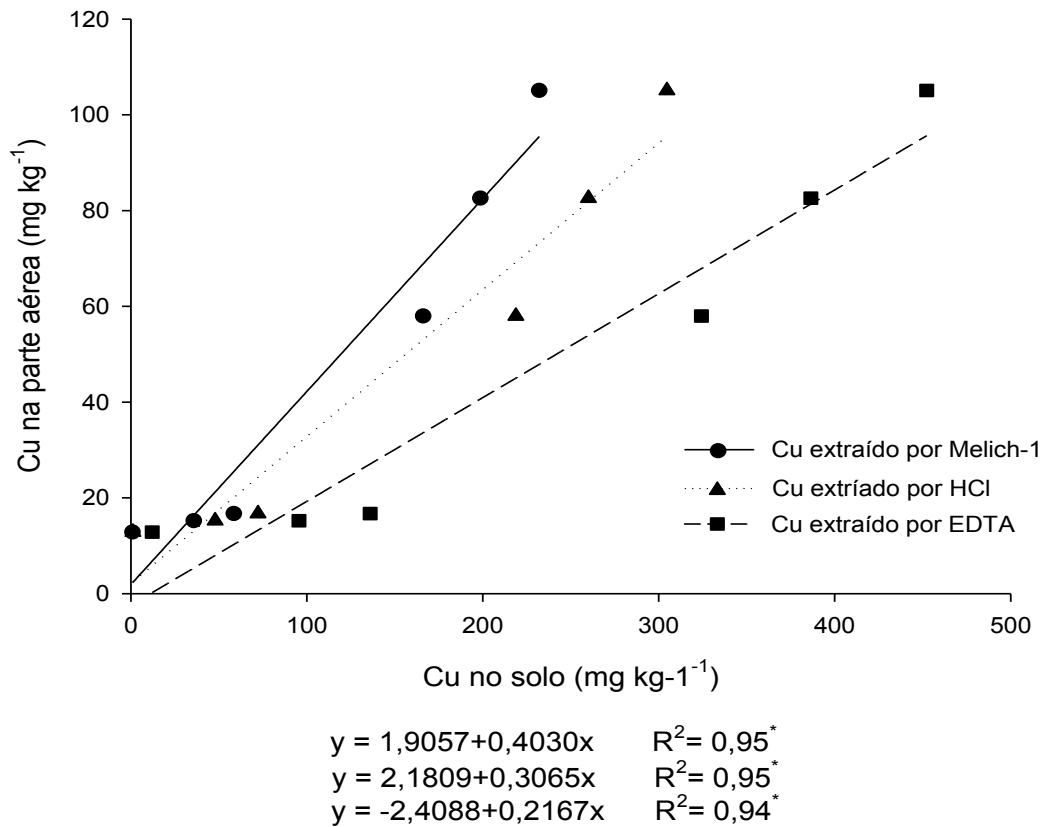
Plantas	Fator de Bioacumulação				Índice de Transferência			
	0	100	200	400	0	100	200	400
<b>Milho</b>	4,66	0,19	0,13	0,17	0,16	0,06	0,05	ND
<b>Feijão de Porco</b>	7,77	0,24	0,17	0,09	0,29	0,08	0,07	0,06
<b>Mucuna Preta</b>	16,09	0,52	0,34	0,19	0,59	0,08	0,07	0,05
<b>Feijão Guandu</b>	13,98	0,48	0,34	0,31	0,71	0,32	0,27	0,14
<b>Pensacola</b>	12,43	0,44	0,30	0,17	0,42	0,14	0,12	0,09
<b>Crotalaria juncea</b>	16,36	0,46	0,38	0,17	0,64	0,20	0,14	0,11
<b>Mucuna Cinza</b>	17,70	0,52	0,34	0,17	0,32	0,07	0,06	0,03
<b>Labe-labe</b>	11,72	0,36	0,27	0,17	0,21	0,16	0,08	0,04
<b>Crotalaria spectabilis</b>	16,09	0,58	0,33	0,20	0,75	0,22	0,10	0,10
	0	400	500	600	0	400	500	600
<b>Feijão de Porco</b>	23,67	0,46	0,47	0,59	1,02	0,29	0,30	0,29
<b>Mucuna Preta</b>	23,81	0,35	0,40	0,40	0,44	0,08	0,08	0,07
<b>Mucuna Cinza</b>	16,04	0,24	0,37	0,36	0,37	0,05	0,05	0,05

ND: não determinado por não possuir massa seca suficiente para a análise.

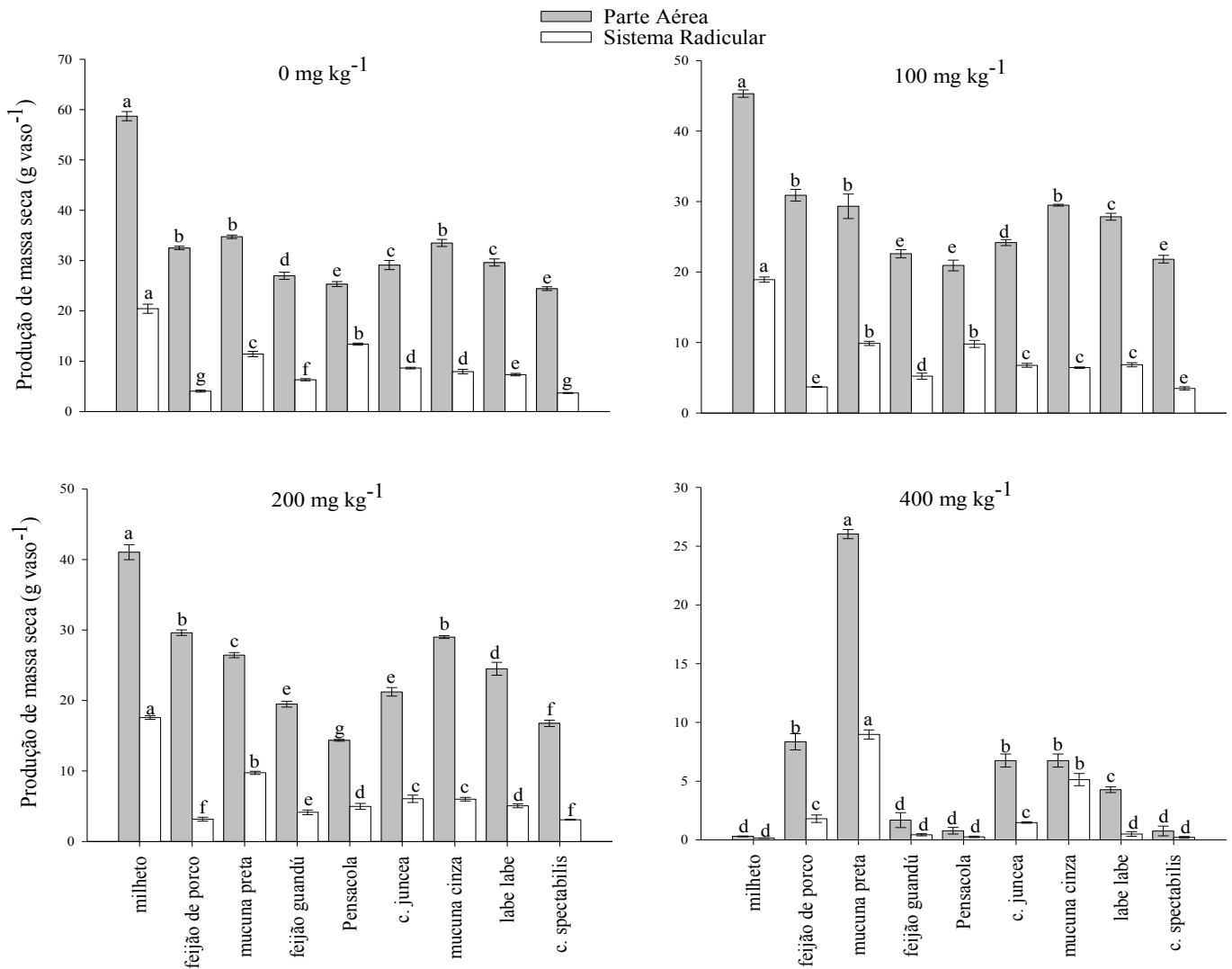
**Tabela 3:** Correlações de Pearson entre a concentração de cobre (Cu) ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) e outros elementos na parte aérea de nove plantas de cobertura de solo de verão: milho (*Pennisetum glaucum* L.), feijão de porco (*Canavalia ensiformis* DC.), mucuna preta (*Mucuna aterrima* L.), feijão guandu anão (*Cajanus cajan* L.), pensacola (*Paspalum notatum* L.), crotalaria (*Crotalaria juncea* L.), mucuna cinza (*Mucuna cinereum* L.), labe-labe (*Dolichos lablad* L.) e crotalaria (*Crotalaria spectabilis* Roth.), e em solo contaminado com 0, 100, 200 e 400  $\text{mg kg}^{-1}$  de cobre no primeiro experimento e com 0, 400, 500 e 600  $\text{mg kg}^{-1}$  de cobre no segundo experimento.

<b>Plantas testadas</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Fe</b>	<b>Zn</b>	<b>N</b>
<b>Milho</b>	0,23*	1,00*	0,82*	1,00*	0,90*	-0,02
<b>Feijão de Porco</b>	-0,97*	0,93*	0,14	0,94*	0,12	-0,65*
<b>Mucuna Preta</b>	-0,92*	0,56	0,41	0,28	0,23	-0,63*
<b>Feijão Guandu</b>	-0,94*	0,88*	0,95*	0,99*	0,97*	0,91*
<b>Pensacola</b>	-0,88*	0,80*	-0,82*	0,83*	0,17	0,08
<b>Crotalaria Juncea</b>	-0,71*	0,84*	-0,29	0,72*	-0,05	0,87*
<b>Mucuna Cinza</b>	-0,78*	-0,11	0,46	-0,41	0,73*	-0,42
<b>Labe-labe</b>	-0,24	0,72*	-0,35	0,52	0,46	0,54
<b>Crotalaria Spectabilis</b>	-0,88*	0,67*	-0,60*	0,96*	0,05	0,80*
	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Fe</b>	<b>Zn</b>	<b>N</b>
<b>Feijão de Porco</b>	-0,93*	-0,40	0,42	0,72*	0,52	0,63*
<b>Mucuna Preta</b>	-0,90*	-0,75*	0,32	0,42	0,60*	0,72*
<b>Mucuna Cinza</b>	-0,91*	0,20	-0,51	0,33	0,59*	0,04

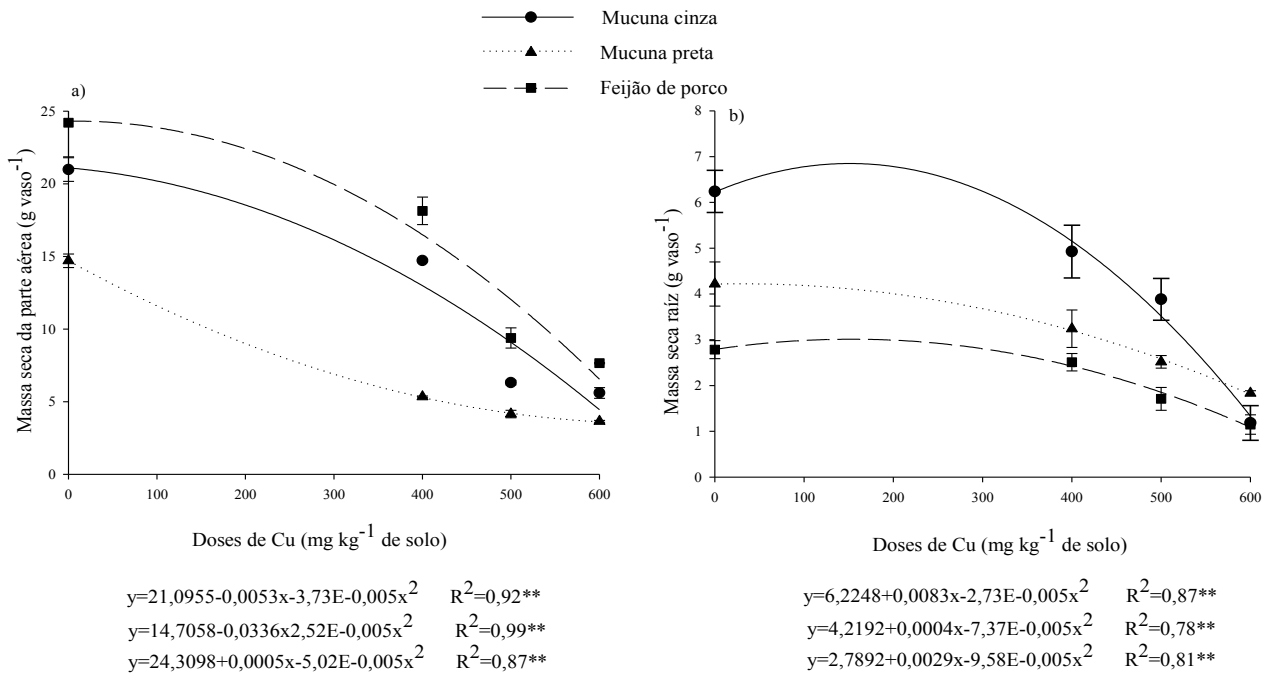
\*  $p < 0,05$



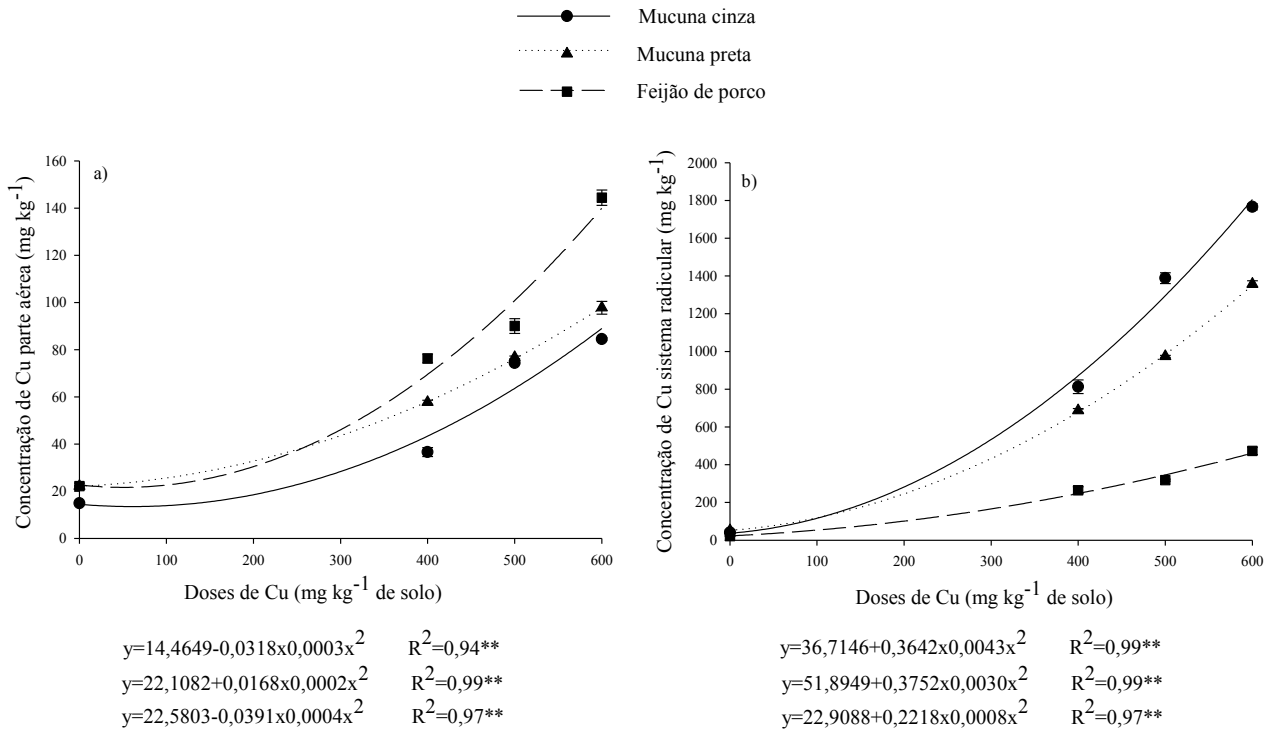
**Figura 1:** Regressão linear entre os teores de cobre no solo extraídos por Melich-1, HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup> e Na<sub>2</sub>-EDTA 0,01mol L<sup>-1</sup>/acetato de amônio 1,0 mol L<sup>-1</sup> e teores na parte aérea de plantas de feijão de porco (*Canavalia ensiformis* DC.), mucuna cinza (*Mucuna cinereum* L.) e mucuna preta (*Mucuna aterrima* L.).



**Figura 2.** Produção de massa seca (g vaso<sup>-1</sup>) da parte aérea e do sistema radicular de nove plantas de cobertura de solo de verão: milho (*Pennisetum glaucum* L.), feijão de porco (*Canavalia ensiformis* DC.), mucuna preta (*Mucuna aterrima* L.), feijão guandú anão (*Cajanus cajan* L.), pensacola (*Paspalum notatum* L.), (crotalaria (*Crotalaria juncea* L.), mucuna cinza (*Mucuna cinereum* L.), labe-labe (*Dolichos lablad* L.) e crotalaria (*Crotalaria spectabilis* Roth.), e cultivadas em Cambissolo da Serra Gaúcha, contaminado com 0, 100, 200 e 400 mg kg<sup>-1</sup> de Cu. Letras iguais entre tratamentos não diferem entre si pelo teste de Scott-knot ( $p < 0,05$ ).



**Figura 3.** Produção de massa seca ( $\text{g vaso}^{-1}$ ) da parte aérea (a) e sistema radicular (b) de mucuna cinza, mucuna preta e feijão de porco em solo contaminado com doses de Cu de 0, 400, 500 e 600  $\text{mg kg}^{-1}$ .  $^{**}$  significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de scott-knott.



**Figura 4.** Concentração de Cu (em  $\text{mg kg}^{-1}$ ) na parte aérea (a) e sistema radicular (b) de mucuna cinza, mucuna preta e feijão de porco em solo contaminado com doses de Cu de 0, 400, 500 e 600  $\text{mg kg}^{-1}$ .  $^{**}$  significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Scott-knott.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As plantas estudadas apresentaram comportamento diferenciado em relação às doses de cobre adicionadas ao solo. Mas de maneira geral, houve diminuição na produção de massa seca de parte aérea e raiz, com o aumento do cobre no solo. A concentração de cobre no tecido aumentou, proporcionalmente, conforme se aumentou os teores disponíveis no solo, principalmente nas raízes. Algumas plantas apresentaram potencial para serem usadas como plantas fitoestabilizadoras de Cu no solo, pois possuem capacidade de se desenvolverem em solos com altas concentrações do metal e, além disso, têm a capacidade de absorver taxas elevadas de Cu mantendo-o no seu sistema radicular. O acúmulo de cobre na parte aérea foi menor em comparação ao sistema radicular, havendo, de maneira geral, baixa translocação do Cu das raízes para a parte aérea. Mesmo assim três genótipos de plantas apresentaram desempenho significativamente superior às demais, apresentando condições razoáveis para serem empregadas em programas de fitoextração. Há ainda a necessidade de mais estudos para identificar as espécies de plantas que possuem a capacidade de acumular grande quantidade de Cu na parte aérea e produzir grande quantidade de biomassa.



## REFERÊNCIAS

- BERTI, W.R. & CUNNINGHAM, S.D. Phytostabilization of metals. In: RASKIN, I. & ENSLEY, B. D. (eds.). **Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment**. New York: Wiley, p.71-88, 2000.
- BLAYLOCK, M. J. & HUANG, J.W. Phytoextraction of metals. In RASKIN, I. & ENSLEY, B. D. (eds.). **Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment**, New York: Wiley, p.53-70. 2000.
- CASALI, C. A. et al. Formas e dessorção de cobre em solos cultivados com videira na Serra Gaúcha do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.1479-1487, 2008.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFSRS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul/UFRGS, 2004. 400p.
- EMBRAPA. **Produção de vinho e mosto de uva em 2009**. Disponível em: [http://www.cnpuv.embrapa.br/prodserv/vitivinicultura/producao/2005\\_2009\\_rs.html](http://www.cnpuv.embrapa.br/prodserv/vitivinicultura/producao/2005_2009_rs.html). Acesso em: jun. 2010.
- GIROTTI, E. **Alterações fisiológicas e bioquímicas em plantas cultivadas em solos com acúmulo de cobre e zinco**. Santa Maria, RS. Universidade Federal de Santa Maria. 2010. 152p. (Tese de Doutorado)
- LAPERCHE, V. et al. Effect of appatite amendments on plant uptake of lead from contaminated soil. **Environmental Science and Technology**, v. 30, p. 1540-1552, 1997.
- LESSA, C. **Comunitá italiana. Supplemento di Economia: Da Serra Gaúcha para a civilização brasileira**. Disponível em: <<http://www.comunitaitaliana.com.br/edicaomes/EconomiaEd84/gaucha.htm>> Acesso em: 4 junho 2010.
- MANTOVANI, A. **Composição química de solos contaminados por cobre: formas, sorção e efeito no desenvolvimento de espécies vegetais**. 2009. 165 f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MARQUES, A. P. G. C. Remediation of heavy metal contaminated soils: phytoremediation as a potentially promising clean-up technology. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v.39, p. 622-64, 2009.

- MARQUES, M. et al. Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1-11, 2011.
- NACHIGALL, G.R et al. Formas de cobre em solos de vinhedos em função do pH e da adição de cama-de-frango. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 427-434, 2007.
- NASCIMENTO, C. W. A. do et al. Fitoextração de metais pesados em solos contaminados: avanços e perspectivas. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 6, p. 461-4495, 2009.
- PEREIRA, A. C. C. et al. Concentração de metais pesados em espécies arbóreas utilizadas para revegetação de área contaminada. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 641-647, 2012.
- PILON-SMITS, E. Phytoremediation. **Annual Revisions in Plant Biology**, v. 56, p.15-39. 2005.
- SANTIBÁÑEZ, C. et al. Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: Implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*. **Science of Total Environment**, v. 395, v.1, p. 1-1), 2008.
- SANTOS, H. P. et al. **Comportamento fisiológico de plantas de aveia (*Avena strigosa*) em solos com excesso de cobre**. Bento Gonçalves: Embrapa, 2004 (Comunicado Técnico 49).
- WONG, M. W. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. **Chemosphere**, v.50, p.775-780, 2003.