

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CAMPUS FREDERICO WESTPHALEN  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA,  
AGRICULTURA E AMBIENTE**

**DESENVOLVIMENTO E CAPACIDADE  
FITOEXTRATORA DE PLANTAS AGRÍCOLAS  
CULTIVADAS EM SOLO COM DIFERENTES  
TEXTURAS E TEORES DE COBRE**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Juliano Cesar da Silva**

**Frederico Westphalen, RS, Brasil  
2019**

**DESENVOLVIMENTO E CAPACIDADE FITOEXTRATORA  
DE PLANTAS AGRÍCOLAS CULTIVADAS EM SOLO COM  
DIFERENTES TEXTURAS E TEORES DE COBRE**

**Juliano Cesar da Silva**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Agronomia.**

**Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Ferreira da Silva**

**Frederico Westphalen, RS, Brasil  
2019**

Silva, Juliano Cesar da  
Desenvolvimento e capacidade fitoextratora de plantas  
agrícolas cultivadas em solo com diferentes texturas e  
teores de cobre / Juliano Cesar da Silva.- 2019.  
86 p.; 30 cm

Orientador: Rodrigo Ferreira da Silva  
Coorientador: Clovis Orlando Da Ros  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Campus de Frederico Westphalen, Programa de Pós  
Graduação em Agronomia - Agricultura e Ambiente, RS, 2019

1. Sorghum bicolor 2. Glycine max 3. Textura de solo  
4. Azuspirillum brasilense 5. Metal pesado I. Silva,  
Rodrigo Ferreira da II. Da Ros , Clovis Orlando III.  
Título.

**Universidade Federal de Santa Maria  
Campus Frederico Westphalen  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Agricultura e  
Ambiente**

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

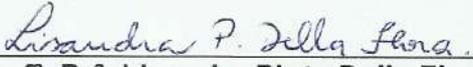
**DESENVOLVIMENTO E CAPACIDADE FITOEXTRATORA DE  
PLANTAS AGRÍCOLAS CULTIVADAS EM SOLO COM DIFERENTES  
TEXTURAS E TEORES DE COBRE**

Elaborada por  
**Juliano Cesar da Silva**

Como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Agronomia**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Rodrigo Ferreira da Silva**  
(Presidente/Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
**Profª. Drª. Lisandra Pinto Della Flora**

  
\_\_\_\_\_  
**Profª. Drª. Marcia Matsuoka Rosa**

Frederico Westphalen, 08 de março de 2019

*Aos meus pais,  
Juarez e Marisa, exemplos  
de vida, que sempre me  
apoiaram e acreditaram  
em minhas vitórias e  
ideais.*

**DEDICO...**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e por estar ao meu lado em todos os momentos.

A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente (PPGAAA) pela oportunidade de cursar o Mestrado, propiciando-me o acesso à Pós-Graduação pública e de qualidade. A Sementes Fabris/BRAXMAS Genética e SEMPRE sementes por disponibilizarem o material genético para o cultivo; a In Campo Agronegócios/Total Biotecnologia por disponibilizarem o inoculante.

Aos meus pais, Juarez e Marisa, pelo amor, compreensão e dedicação para que pudesse realizar meu sonho, permanecendo sempre ao meu lado, me dando todo apoio necessário para que pudesse chegar até aqui.

As minhas irmãs, Ana Paula e Fernanda e meus avós, Adão e Irani pelo apoio e incentivo.

A Daiane Prochnow, pelo carinho, amor, incentivo e apoio incondicional durante essa caminhada.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Ferreira da Silva, pela confiança, orientação, por todo apoio necessário para condução deste trabalho e principalmente pela amizade.

Ao Prof. Dr. Clovis O. Da Ros e Prof. Dr. Vanderlei R. da Silva pelos ensinamentos.

Ao Prof. Dr. Genesio M. da Rosa pelo incentivo, apoio e por disponibilizar infraestrutura a fim de possibilitar a condução dos experimentos. Ao Prof. Dr. Elder Eloy e Prof. Dr. Arci D. Wastowski por disponibilizarem os laboratórios para avaliações.

Aos técnicos de laboratório Andrea, Felipe, Lucindo e Marcela pela ajuda nas análises e avaliações.

Aos colegas do Laboratório de Microbiologia e Biologia do solo pelo auxílio em toda a condução dos experimentos e aos colegas do laboratório de física do solo pela parceria durante estes dois anos de pós-graduação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001"

Aos amigos que fizeram parte desses momentos sempre me ajudando e incentivando.

Enfim, a todos aqueles não citados, que contribuíram diretamente e indiretamente para que eu vencesse mais esta importante etapa de minha vida.

A todos vocês, **MUITO OBRIGADO.**

*“Pouca ciência torna os homens orgulhosos, muita ciência torna os homens humildes. Assim, espigas vazias elevam a cabeça soberba, enquanto espigas cheias inclinam-se humildemente para a terra!”*

Leonardo da Vinci

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Agricultura e Ambiente  
Universidade Federal de Santa Maria

### DESENVOLVIMENTO E CAPACIDADE FITOEXTRATORA DE PLANTAS AGRÍCOLAS CULTIVADAS EM SOLO COM DIFERENTES TEXTURAS E TEORES DE COBRE

AUTOR: JULIANO CESAR DA SILVA  
ORIENTADOR: RODRIGO FERREIRA DA SILVA  
Data e Local da Defesa: Frederico Westphalen, 08 de março de 2019.

A adição de cobre pelas atividades antrópicas influencia os teores do metal no solo, tornando este elemento potencialmente tóxico às espécies agrícolas. A dinâmica do cobre no solo sofre influência das características físicas e químicas do solo bem como da atividade de microrganismos simbióticos associados a diferentes culturas. Desse modo, este trabalho teve como objetivo analisar a influência da contaminação por cobre, avaliando sua dinâmica em solos com diferentes texturas no cultivo da soja e do sorgo. Para atender esse objetivo desenvolveu-se três experimentos, no qual o primeiro avaliou o desenvolvimento de plantas agrícolas cultivadas em solo com diferentes texturas e teores de cobre; O segundo testou a capacidade fitoextratora de plantas agrícolas cultivadas sob diferentes percentuais de argila e como isso afetou os teores de cobre nos solos contaminados; O terceiro determinou a interferência de uma bactéria fixadora de nitrogênio no desenvolvimento do sorgo em solo contaminado com cobre. Os resultados evidenciaram que a cultura da soja e do sorgo sofrem influência negativa pela adição de cobre no solo, e o teor deste é afetado pela textura do solo. Solos com 17,5 % de argila possibilita maior disponibilidade de cobre em condições de menor Pseudo-total. Quanto mais argiloso o solo, maior é amplitude entre cobre disponível e Pseudo-Total. O acréscimo de cobre no solo tem interação positiva com o aumento deste metal no grão da soja, assim áreas contaminadas com cobre podem ser consideradas impróprias para o cultivo desta espécie. A inoculação com *Azospirillum brasilense* possibilita maior desenvolvimento da parte aérea do sorgo e reduz teor de cobre em parte aérea.

**Palavras-chave:** *Sorghum bicolor*. *Glycine max*. Textura de solo. *Azospirillum brasilense*. Metal pesado.

## ABSTRACT

Master dissertation  
Graduate Program in Agronomy: Agriculture and Environment  
Universidade Federal de Santa Maria

### DEVELOPMENT AND PHYTOEXTRACT CAPACITY OF AGRICULTURAL PLANTS CULTIVATED IN SOIL WITH DIFFERENT TEXTURES AND COPPER CONTENTS

AUTHOR: JULIANO CESAR DA SILVA  
ADVISOR: RODRIGO FERREIRA DA SILVA  
Date and Place of Defense: Frederico Westphalen, March 8, 2019.

The addition of copper by anthropic activities influences the metal content of the soil, making this element potentially toxic to agricultural species. The dynamics of copper in the soil is influenced by the physical and chemical characteristics of the soil as well as the activity of symbiotic microorganisms associated with different cultures. Therefore, this work had as objective to analyze the influence of the contamination by copper, evaluating its dynamics in soils with different textures in the cultivation of soybean and sorghum. In order to meet this objective, three experiments were developed: the first evaluated the development of agricultural plants cultivated in soil with different textures and copper contents; the second tested the phytoextractive capacity of agricultural plants cultivated under different percentages of clay and how this affected copper levels in contaminated soils and the third determined the interference of a nitrogen fixing bacteria in the development of sorghum in soil contaminated with copper. The results showed that the soybean and sorghum crops are negatively influenced by the addition of copper in the soil, and its content is affected by soil texture. Soils with 17.5% of clay allow greater availability of copper under conditions of lower Pseudo-total. The more clayey the soil, the greater the amplitude between available copper and Pseudo-Total. The increase of copper in the soil has a positive interaction with the increase of this metal in the soybean grain, so areas contaminated with copper can be considered unsuitable for the cultivation of this species. The inoculation with *Azospirillum brasilense* allows greater development of the aerial part of the sorghum and reduces the content of copper in aerial part.

**Keywords:** *Sorghum bicolor*. *Glycine max*. Soil texture. *Azospirillum brasilense*. Heavy metal.

## LISTA DE TABELAS

### 3 CAPÍTULO 1 - DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS AGRÍCOLAS CULTIVADAS EM SOLO COM DIFERENTES TEXTURAS E TEORES DE COBRE

Tabela 1 - Textura e análise química dos solos construídos utilizado para cultivo da cultura da soja e sorgo.....	33
tabela 2 - Altura de planta(AP), diâmetro de colmo (DC) e comprimento de raiz (CR) da cultura da soja cultivado em 4 solos com diferentes texturas (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila), submetido a doses de cobre em mg de cobre kg <sup>-1</sup> de solo (zero (0), 40, 80, 160, 240, 320 e 400) .....	38
tabela 3 - Massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca raiz (MSR), clorofila a, b e total da cultura da soja submetida a diferentes doses de cobre. ....	39
tabela 4 - Número de grãos por planta, massa seca de planta e massa seca de raiz da cultura da soja, cultivada em diferentes texturas de solo .....	40
tabela 5 - Volume, área superficial e diâmetro médio de raízes de soja cultivado em solos com diferentes texturas e doses de cobre .....	41
tabela 6 - Diâmetro do colmo, altura de planta, número de perfilhos e volume de raiz de sorgo, cultivado em diferentes doses de cobre no solo (mg de cobre kg <sup>-1</sup> ) .....	42
tabela 7 - Médias de clorofila a, b e total do sorgo cultivado com diferentes doses de cobre no solo .....	43
tabela 8 - Médias de clorofila a, b e total de sorgo, cultivado em diferentes texturas de solo.....	43

### 4. CAPÍTULO 2 – INFLUÊNCIA DA TEXTURA NA CAPACIDADE FITOEXTRATORA DE PLANTAS AGRÍCOLAS E NOS TEORES DE COBRE EM SOLOS CONTAMINADOS

Tabela 1 - Textura e análise química dos solos construídos utilizado para cultivo da cultura da soja e sorgo.....	57
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

### 5 CAPÍTULO 3 –BACTÉRIAS FIXADORAS DE NITROGÊNIO PARA O DESENVOLVIMENTO DE SORGO EM SOLO CONTAMINADO COM COBRE

Tabela 1– Caracterização física e química do solo utilizado para cultivo da cultura da soja e sorgo inoculados com fixadores de nitrogênio e com aplicação de doses de cobre no solo. ....	74
tabela 2- Médias de diâmetro de colmo (DC), altura de planta (AP), número de folhas (NF), massa seca de parte aérea (MSP), massa seca de raiz (MSR) e área foliar (AF), clorofila b (CL b) e clorofila a (CL a) de plantas de sorgo com ou sem inoculação com <i>Azospirillum brasilense</i> . ....	78
tabela 3 - Comprimento radicular (CR), massa seca de raízes (MSR), massa seca de parte aérea (MSP), e área foliar (AF) de sorgo cultivado com doses de cobre no solo....	79

## LISTA DE FIGURAS

### 3 CAPÍTULO 1 - DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS AGRÍCOLAS CULTIVADAS EM SOLO COM DIFERENTES TEXTURAS E TEORES DE COBRE

- Figura 1 - Teor pseudo-total de cobre em solos com 4 texturas diferentes (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila), no final do cultivo de soja, submetido a doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo)..... 36
- figura 2 - Teor pseudo-total de cobre em solos com 4 texturas diferentes (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila), no final do cultivo de sorgo, submetido a doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo). ..... 36
- figura 3 - Equações de regressão para massa seca da parte aérea (A) e raiz (B) de sorgo cultivado em quatro texturas de solo (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila) e doses de cobre em mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400). ..... 44
- figura 4 - Equações de regressão teor de cobre (mg.kg<sup>-1</sup>) da parte aérea e raiz de sorgo cultivado em solos com diferentes texturas (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup>). ..... 45
- figura 5 - Equações de regressão teor de cobre (mg.kg<sup>-1</sup>) da parte aérea e raiz de soja cultivada em solos com diferentes texturas (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup>). ..... 46
- figura 6 - Equações de regressão para o teor de cobre (mg kg<sup>-1</sup>) nos grãos de soja (A) e grãos de sorgo (B) cultivados em quatro solos de diferentes texturas (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup>)... 47

### 4. CAPÍTULO 2 – INFLUÊNCIA DA TEXTURA NA CAPACIDADE FITOEXTRATORA DE PLANTAS AGRÍCOLAS E NOS TEORES DE COBRE EM SOLOS CONTAMINADOS

- Figura 1- Teor pseudo-total de cobre ao final do cultivo de soja e sorgo, em solos de 4 texturas (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila) cultivados com soja e sorgo, submetido a doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo). ..... 59
- figura 2 - Cobre disponível e pseudo -total em solos sob cultivo de soja, 4 texturas de solo (T17.5, T35, T52.5 e T70 % de argila) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo)..... 61
- figura 3- Cobre disponível e pseudo -total em solos sob cultivo de sorgo, 4 texturas de solo (T17.5, T35, T52.5 e T70 % de argila) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo)..... 62
- figura 4 - Fator de bioconcentração (A) e de bioacumulação (B) de cobre na cultura da soja cultivado em solos com diferentes porcentagens de argila (T17.5, T35, T52.5 e T70 % de argila) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo)..... 63
- figura 5 - Fator de bioconcentração (A) e de bioacumulação (B) de cobre na cultura do sorgo cultivado em solos com diferentes porcentagens de argila (T17.5, T35, T52.5 e T70 % de argila) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo)..... 64

figura 6 - Índice de tolerância (ITOL) (A) e índice de translocação (ITRA) (B) de cobre na cultura da soja, ITOL (C) e ITRA (D) de cobre na cultura do sorgo cultivadas em solos com diferentes porcentagens de argila ( T17.5, T35, T52.5 e T70 % de argila)) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo).  
 ..... 65

## **5 CAPÍTULO 3 –BACTÉRIAS FIXADORAS DE NITROGÊNIO PARA O DESENVOLVIMENTO DE SORGO EM SOLO CONTAMINADO COM COBRE**

Figura 1– Cobre disponível no solo sob cultivo de sorgo com inoculação de *Azospirillum brasilense*, aplicação de nitrogênio e doses de cobre no solo. .... 77

figura 2 - Teores de cobre na parte aérea e radicular de sorgo com e sem inoculação de *Azospirillum brasilense*, cultivado com doses de cobre no solo. .... 80

figura 3 - Volume (VOL) e área superficial específica (ASE) radicular de sorgo com inoculação de *Azospirillum brasilense*, aplicação de nitrogênio e doses de cobre no solo. .... 80

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1 COBRE E ÁREAS CONTAMINADAS .....	16
2.2 COBRE E TEXTURA DE SOLO .....	17
2.3 FITOEXTRAÇÃO.....	20
2.4 CULTURA DA SOJA E SORGO .....	21
2.5 FIXADORES DE NITROGÊNIO.....	23
2.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	25
<b>3. CAPÍTULO 1 - DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS AGRÍCOLAS CULTIVADAS EM SOLO COM DIFERENTES TEXTURAS E TEORES DE COBRE .....</b>	<b>31</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	31
3.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	33
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	35
<b>3.3.1 Influência da textura do solo e doses de cobre sobre o desenvolvimento da soja .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.2 Influência da textura do solo e doses de cobre sobre o desenvolvimento do Sorgo.....</b>	<b>41</b>
<b>3.3.3 Influência da textura do solo e doses de cobre sobre o teor de cobre em plantas de Soja e Sorgo.....</b>	<b>45</b>
3.4 CONCLUSÕES.....	48
3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	48
<b>4 CAPÍTULO 2 – INFLUÊNCIA DA TEXTURA NA CAPACIDADE FITOEXTRATORA DE PLANTAS AGRÍCOLAS E NOS TEORES DE COBRE EM SOLOS CONTAMINADOS .....</b>	<b>53</b>
4.1 INTRODUÇÃO.....	53
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	56
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	58
4.4 CONCLUSÕES.....	66
4.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67
<b>5 CAPÍTULO 3 – BACTÉRIAS FIXADORAS DE NITROGÊNIO PARA O DESENVOLVIMENTO DE SORGO EM SOLO CONTAMINADO COM COBRE ....</b>	<b>72</b>
5.1 INTRODUÇÃO.....	72
5.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	74
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	76
5.4 CONCLUSÕES.....	81
5.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>86</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O cobre é um constituinte natural de rochas e sedimentos, sendo que em condições naturais, a principal fonte desse elemento no solo é o material de origem. Porém, existem fontes artificiais, como emissões de indústrias, efluentes, dejetos de animais, fertilizantes e pesticidas, que podem contribuir para o aumento da concentração deste metal no solo, inclusive práticas agrícolas inadequadas podem levar a acumulação de Cu no solo. Os rejeitos ao entrarem em contato com o solo sofrem transformações químicas que liberam cobre para a solução, causando toxidez para as plantas e microrganismos, podendo também ser adsorvido à argila. O cobre se difere de outras substâncias tóxicas, pois não pode ser sintetizado nem destruído pelo homem. Esse fato faz com que a poluição do solo por esse elemento venha recebendo especial atenção, pois o problema é reconhecido mundialmente e sabe-se que, pode causar sérios riscos à saúde humana e à qualidade ambiental.

Os solos apresentam diferentes formas de disponibilizar seus elementos minerais para as plantas, o que dependerá do teor disponível de nutrientes, resultado do intemperismo das rochas, do pH da solução e das propriedades químicas e físicas do solo, em especial da quantidade de argila e matéria orgânica, no caso dos micronutrientes. O teor de argila é um dos principais fatores responsáveis pela variação da adsorção de cobre em horizontes superficiais em Latossolos e Argissolos brasileiros, os solos arenosos tendem a ser os mais suscetíveis à ocorrência de contaminação devido à baixa capacidade de reter íons, sendo que o conteúdo de argila está entre as variáveis que apresentam grande correlação com os teores de metais pesados para os solos estudados

A cultura da soja (*Glycine max* L.) tem grande relevância na balança comercial brasileira e no suprimento do mercado interno, sendo considerada a principal *commodity* agrícola, colocando o país em segundo lugar no *ranking* mundial. A cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) destaca-se pela sua rusticidade e grande tolerância ao déficit hídrico, características que tem potencializado a expansão de sua área plantada no Brasil, apresenta sistema radicular abundante, o que contribui para a infiltração de água, além de favorecer a agregação e a aeração do solo. No sorgo a toxicidades de cobre no solo, causa aparecimento de pontos necróticos na borda dos folíolos das folhas mais velhas, que progridem para as mais novas.

Várias estratégias vêm sendo adotadas para integrar conhecimentos que auxiliem na reabilitação de solos contaminados com metais pesados, possibilitando o retorno dos mesmos a funcionalidade e estabilidade do ecossistema. A utilização de plantas fitoextratoras é uma das alternativas viáveis adotadas, onde o excesso de metais pesados é retirado do solo pelas plantas e acumulado nos seus tecidos. Porém, não são todas as espécies que possuem essa capacidade de fitoextração, sendo necessário estudos com diferentes espécies que propiciem o conhecimento das características individuais de crescimento, desenvolvimento e assimilação de nutrientes, para saber se uma planta realmente pode ser utilizada para esse fim.

A capacidade de fixar nitrogênio simbioticamente é encontrada em vários grupos de microrganismos, dentre os microrganismos fixadores de N encontrados em associações com raízes de gramíneas, as espécies do gênero *Azospirillum* constituem um dos grupos mais estudados. Nessa simbiose não ocorre a colonização dos tecidos vegetais pela bactéria e nem a formação de uma estrutura especializada para a fixação do nitrogênio, estudos tem demonstrado que além da capacidade de fixar N<sub>2</sub>, o *Azospirillum* também possui outras propriedades, que resultam na promoção do crescimento vegetal, assim o ganho com *Azospirillum* spp. vai mais além do que simplesmente auxiliar na fixação biológica do nitrogênio, interferindo também no aumento da superfície de absorção das raízes da planta e, conseqüentemente, no aumento do volume de substrato do solo explorado.

Nesse sentido as hipóteses que permeiam esse estudo são: (i) Solos contaminados por cobre limitam o crescimento e desenvolvimento de culturas agrícolas; (ii) O teor pseudo-total e disponível de cobre é influenciado pela textura do solo, restringindo à aptidão ao cultivo de culturas agrícolas em áreas contaminadas com cobre; e (iii) A utilização de bactérias fixadoras de nitrogênio possibilita o desenvolvimento e o crescimento de sorgo em solo contaminado com cobre. Desse modo, este trabalho teve como objetivo determinar a influência da textura do solo e de bactérias fixadoras de nitrogênio na disponibilidade de cobre e no desenvolvimento e capacidade fitoextratora de soja e sorgo.

Para atender às hipóteses e ao objetivo deste trabalho foram realizados três experimentos: (I) desenvolvimento de plantas agrícolas cultivadas em solo com diferentes texturas e teores de cobre; (II) influência da textura na capacidade fitoextratora de plantas agrícolas e nos teores de cobre em solos contaminados e (III) bactérias fixadoras de nitrogênio para o desenvolvimento de sorgo em solo contaminado com cobre.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 COBRE E ÁREAS CONTAMINADAS

A preocupação crescente com a poluição do meio ambiente, sobretudo com a poluição dos solos. As pesquisas nesta área justificam-se pela grande necessidade de remediar esse problema, a fim de garantir a manutenção de um ambiente saudável (FERREIRA et al., 2016).

Áreas contaminadas são locais que podem configurar riscos à saúde pública e ao meio ambiente. De acordo com a resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o valor orientador como limite máximo para o cobre total em áreas agrícolas é de 200 mg kg<sup>-1</sup> sem que ocorra intervenção (CONAMA, 2009). A Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM) em sua portaria Nº 85/2014, indica um valor de referência de qualidade (VQR) para cobre total em solos originados de rochas vulcânicas do Planalto do Estado do Rio Grande do Sul, classificado de acordo com as províncias geomorfológicas/geológicas, é de 203 mg kg<sup>-1</sup> (FEPAM, 2014). No estado do Rio Grande do Sul a maioria dos solos contaminados por cobre, estão sob cultivo de vitivinicultura na serra do Nordeste e em áreas de mineração na serra do sudeste (ANDREAZZA et al., 2013).

Atividades antrópicas, como mineração, industrial e agrícolas, têm impactos negativos sobre o ecossistema (GOMES et al., 2011). As fontes de contaminação por cobre são encontradas sobretudo em atividades de mineração e fundição, em fertilizantes, fungicidas e biosólidos utilizados na agricultura e em lodos de estações de tratamento de água (BASSO; KIANG, 2017). Para os seres humanos, a contaminação com cobre (Cu) leva a graves complicações à saúde, podendo causar câncer e até mesmo a morte (ANDREAZZA et al., 2013). O uso de resíduos animais (dejetos de suínos e cama de aves) como fertilizantes do solo é a forma de reciclagem predominante e mais frequente, devido, esse ser um insumo de baixo custo e com benefício para a fertilidade do solo (LOURENÇO et al., 2013; MONDARDO et al., 2009). Entretanto, o grande volume de dejetos e resíduos produzidos, associado à concentração da produção e descarte em determinadas regiões, podem ser potencialmente poluidores dos recursos naturais (KONZEN, 2003).

O cobre é classificado como um metal pesado, entretanto é considerado como elemento essencial aos vegetais (YRUELA, 2009). Elementos com densidade relativa maior

que  $5 \text{ g cm}^{-3}$  são considerados como metais pesados, podem estar presentes em rochas e em locais de aplicação de rejeitos e alguns produtos utilizados na agricultura (CARNEIRO; SIQUEIRA; MOREIRA, 2001). No entanto, quando o cobre está presente no solo em altas concentrações pode prejudicar o crescimento e desenvolvimento das plantas, sendo agente de distúrbios provocados na estrutura das proteínas e inibindo o alongamento celular (YRUELA, 2013). Neste sentido, o excesso de cobre pode interferir na fotossíntese, síntese de pigmentos e outros mecanismos importantes, assim, podendo provocar redução do crescimento das plantas (SÁNCHEZ-PARDO; FERNÁNDEZ-PASCUAL; ZORNOZA, 2014). Em altas concentrações o cobre causa danos aos seres vivos, com efeitos tóxicos ao tecido vegetal e induz a deficiência de outros nutrientes básicos através de relações antagônicas (ANDREAZZA et al., 2010; SODRÉ; LENZI; DA COSTA, 2001; TAIZ et al., 2017)

Alguns metais são essenciais ao crescimento dos vegetais, pois fazem parte da constituição de enzimas e proteínas (zinco e cobre, por exemplo), e podem se tornar tóxicos as plantas quando em elevadas concentrações (RODRIGUES et al., 2016). Por ser um metal pesado, o cobre causa maior preocupação, pois sua ingestão em altas concentrações pode acarretar irritação e corrosão da mucosa, problemas hepáticos, renais e irritação do sistema nervoso central (BASSO; KIANG, 2017). Os altos níveis de metais pesados no solo se devem a intensa e contínua utilização desses elementos pela atividade antrópica sobretudo na agricultura (ANDRADEA et al., 2010; ANDREAZZA et al., 2013).

As principais preocupações em relação à adição de metais aos solos são: entrada na cadeia alimentar, redução da produtividade agrícola devido a efeitos fitotóxicos, acúmulo no solo, alteração da atividade microbiana e contaminação de recursos hídricos (PIRES; ANDRADE; COSCIONE, 2006). Algumas pesquisas trazem os teores de cobre na matéria seca de dejetos suíno  $795 \text{ mg kg}^{-1}$  (BASSO et al., 2012) e média de  $209,5 \text{ mg kg}^{-1}$  de dejetos utilizados em experimentos de 6 anos de cultivo (LOURENZI et al., 2016), deste modo evidenciando potencialidade poluidora deste composto.

## 2.2 COBRE E TEXTURA DE SOLO

A disponibilidade de cobre se relaciona à força de interação com os diferentes componentes do solo. Assim, a sorção máxima ao acúmulo do elemento na interface solo-

solução, é diferente entre os constituintes, diminuindo conforme a seguinte ordem: óxidos de Mn > matéria orgânica > óxidos de Fe > argilominerais (BRADL, 2004).

O cobre pode estar complexado com a fração orgânica e a inorgânica do solo, sendo a sua solubilidade controlada por reações químicas que ocorrem na superfície dos colóides do solo, denominados de adsorção/dessorção, precipitação e complexação (SILVEIRA et al., 1999). Os óxidos de alumínio, ferro, manganês e os grupos funcionais ácidos da matéria orgânica compreendem as superfícies reativas mais representativas, por apresentarem maiores pontos de contatos com a solução do solo, sendo que apresentam maiores superfícies específicas. As reações de adsorção que ocorrem na interface sólido-líquido são um importante mecanismo controlador da atividade química de cobre não apenas na solução do solo, mas, também, em corpos de águas naturais (MCBRIDE; SAUVÉ; HENDERSHOT, 1997; PETRONIO et al., 1996; SALAM; HELMKE, 1998).

A concentração de metais pesados na solução do solo resulta do equilíbrio entre as reações de precipitação, dissolução, complexação e adsorção, estas por sua vez são influenciadas por diversos fatores, como tipo de solo, clima, cultura e forma química dos elementos (MEDINA et al., 2018). Dentre as propriedades do solo que influenciam as reações dos metais e sua mobilidade incluem-se a superfície específica, a textura, a temperatura, o pH, o potencial redox, a capacidade de troca catiônica (CTC), a quantidade de matéria orgânica, a quantidade e o tipo de minerais de argila, o tipo e a quantidade de metais e a competição iônica (MATOS; FONTES; MARTINEZ, 1998).

O grau de adsorção depende da eletronegatividade das partículas do solo e do potencial de ionização dos íons adsorvidos. Neste sentido, é necessário considerar que cada tipo de solo, de acordo com suas características, possui uma determinada capacidade de retenção de metais pesados, quando se excede esta capacidade, o cobre pode sofrer lixiviação e por conseqüentemente contaminação de solo (MAMEDES, 2017). A capacidade de retenção de metais contaminantes no solo é de fundamental importância quando relacionada à solubilidade e à disponibilidade do poluente no meio (GONÇALVES et al., 2013). No caso de solos muito intemperizados, como os ácricos, que apresentam predominância de mineralogia oxidica na fração argila, a reação de adsorção de cobre tem características distintas de solos com mineralogia 2:1.

Além do detalhamento da dinâmica do cobre nos solos através das frações, é importante estudar o comportamento adsorptivo dele pelos solos, tornando-se fundamental prever os impactos ambientais causados pelos mesmos, pois os efeitos desfavoráveis de altas concentrações no ambiente estão relacionados à habilidade dos solos de adsorver tais

substâncias (JORDÃO et al., 2000). Se considerarmos que o acúmulo de metais pesados em solos agrícolas é um aspecto de grande preocupação quanto à segurança ambiental (SILVEIRA et al., 1999), desta forma evidencia-se a importância de estudos no sentido de gerar dados para o melhor entendimento destas relações.

No entanto, alguns solos argilosos tipicamente lateríticos também podem ser altamente permeáveis, isto é, quando estruturados e com influência da macroporosidade. Esses solos argilosos apresentam características como alta quantidade de agregados (peds) com estrutura porosa e são constituídos predominantemente de argilominerais, cimento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e alto teor de umidade (BASSO; KIANG, 2017). Os solos arenosos são os mais suscetíveis à ocorrência de contaminação devido à alta condutividade hidráulica e à baixa capacidade de reter íons (FREEZE e CHERRY, 1979).

Existem três grupos principais de classes conhecidas dentro da classificação textural, sendo elas solos argilosos, francos e arenosos (BRADY; WEIL, 2013; CENTENO et al., 2017). A textura do solo é um indicador de qualidade e de produtividade dos solos, pois influencia nos processos ecológicos e hidrológicos, como a retenção de água, troca iônica na dinâmica de adesão e coesão entre as partículas, na ciclagem de nutrientes e consequentemente no manejo dos solos, interferindo na resistência do solo à tração (HE et al., 2014).

Solos com textura arenosa apresentam menor teor de matéria orgânica e deficiência de fósforo, pois apresenta cerca de 70% de areia em sua composição, o que os torna muito permeáveis, com baixa capacidade de retenção de água e adsorção de íons. Solos com textura franca, ou textura média, caracterizam-se por apresentar proporções semelhantes de partículas de areia, silte e argila, sendo considerados solos com boa drenagem e capacidade de retenção de água, apresentando erodibilidade média (BRADY; WEIL, 2013).

Os processos químicos que podem ocorrer entre o solo e o contaminante são reações do tipo: adsorção-desorção, ácido-base, dissolução-precipitação, oxidação redução, processos biológicos e complexação, a transferência real de contaminantes da fase líquida para a fase sólida acontece nas reações de adsorção-desorção e precipitação-dissolução (MACHADO et al., 2004). A adsorção é um processo que leva ao acúmulo de matéria na interface entre uma fase sólida e líquida, a superfície sólida é o adsorvente e o adsorbato é a molécula ou íon da solução que pode ser adsorvido (SPOSITO, 2008).

A presença de elementos competidores também pode afetar a adsorção (MOREIRA; ALLEONI, 2010), avaliaram a adsorção competitiva de Cd, Ni, Zn e Cu, em solos de São Paulo, e perceberam que a competição diminuiu a capacidade máxima de adsorção (CMA)

dos metais. A CMA também pode variar de acordo com o tipo de solo. Solos argilosos ou bastante intemperizados e, por isso, com maior número de sítios de adsorção, tendem a apresentar maior capacidade máxima de adsorção (LOPES et al., 2014a).

O cobre é adsorvido, predominantemente, por adsorção específica na fração mineral do solo (argila)(ARAÚJO, 2000). O comportamento de metais pesados em solos intemperizados, principalmente com relação à sua adsorção, e a identificação dos fatores que mais influenciam sua mobilidade e biodisponibilidade podem oferecer subsídios para a previsão de fitotoxidez e da possível contaminação do lençol freático por esses elementos (ARAÚJO et al., 2002).

Torna-se necessário o conhecimento da atuação da textura de solo frente a diferentes situações, como o comportamento em relação a contaminação com metais e a resposta das culturas cultivadas em solos com diferentes texturas (CENTENO et al., 2017).

### 2.3 FITOEXTRAÇÃO

A utilização de plantas para a recuperação de áreas contaminadas, técnica conhecida como fitorremediação, tem se popularizado e surgido como alternativa viável, uma vez que é considerada de baixo custo, promove a manutenção da fertilidade do solo, além de ter como principal fonte de energia a luz solar (Robinson et al., 2003)

A capacidade das plantas em extrair os metais do solo e acumulá-los preferencialmente na parte aérea, é denominada fitoextração (ZANCHETA et al., 2011), assim, o uso de plantas para remoção de metais dos solos mediante a absorção pelas raízes, transporte e concentração na parte aérea. Para isto é essencial que o solo não apresente altos níveis de contaminação e que a planta apresente tolerância ao metal, tenha a capacidade de desenvolver um sistema radicular abundante, taxa de crescimento rápido, alta produção de biomassa e acumule na parte aérea elevadas quantidades do metal (MARQUES; RANGEL; CASTRO, 2009). As plantas atuam direta ou indiretamente na remediação ambiental por meio de diferentes mecanismos básicos, que conferem capacidade de: (a) “sequestro” e acúmulo de contaminantes inorgânicos tóxicos (ex.: metais) nos tecidos vegetais, particularmente em vacúolos, seguido de colheita e disposição final ou extração dos metais (o termo “biomineração” é usado quando níveis comerciais de fitoacumulação são alcançados) (MARQUES; AGUIAR; DA SILVA, 2011).

A sobrevivência das espécies que crescem em solos contaminados está relacionada à capacidade de tolerar e não de anular a toxicidade do elemento contaminante (BAKER, 1987). As concentrações dos metais pesados variam nos diferentes tecidos da planta, e, em geral, os grãos contêm concentração menor do que as partes vegetativas da planta (BETTIOL; CAMARGO, 2006). Os solos apresentam diferentes formas de disponibilizar seus elementos minerais para as plantas, o que dependerá do teor disponível de nutrientes no solo, resultado do intemperismo das rochas, do pH da solução e das propriedades químicas e físicas do solo, em especial, no caso dos micronutrientes, da quantidade de argila e matéria orgânica (SANTOS et al., 2008).

A planta ideal para uso em fitoextração deve ter as seguintes características: habilidade de hiperacumular metais extraídos, preferencialmente nas partes aéreas, rápido crescimento e alta produção de biomassa, tolerância às altas concentrações dos metais no solo e colheita fácil (ZANCHETA et al., 2011). Nesse sentido, espécies de interesse agrônomico podem ser uma alternativa para utilização em solos contaminados, desde que não acumulem o cobre na parte aérea em níveis tóxicos às plantas e animais, possibilitando a utilização econômica dessas áreas.

#### 2.4 CULTURA DA SOJA E SORGO

A soja, *Glycine max* L., é uma das principais culturas utilizadas no Brasil, sendo produzida em todas as regiões do país. Na safra 2017/2018, contou com uma área de cultivo de 35,1 milhões de hectares, atingindo produção de 119,2 milhões de toneladas, com produtividade média de 3394 Kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2018).

A soja é o item mais importante da agroindústria brasileira, sendo o Brasil o segundo maior produtor mundial do grão, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. A soja serve como matéria-prima para diversos alimentos, como óleo, margarina, leite, molhos, queijo, farinha, proteína texturizada, entre outros e o farelo da soja é usado para alimentação animal. Na extração do óleo bruto é obtida a lecitina, utilizada como estabilizante, espessante, emulsificador.

No caso da sojicultura, além do crescimento da produtividade houve uma expansão da atividade, até a virada do século, a mesorregião Noroeste respondia por mais de 80% da área plantada de soja no RS, contudo a participação foi de aproximadamente 56% na safra

2015/2016. Os avanços mais expressivos da cultura ocorreram em direção ao sudoeste e a sudeste do estado do Rio Grande do Sul, em substituição de áreas de pastagem e de outras lavouras temporárias (FEIX et al., 2016). Tecnicamente, os solos de textura arenosa ( $< 150 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) não são recomendados para o cultivo de culturas econômicas anuais devido às suas limitações relacionadas a baixa disponibilidade de nutrientes, baixa capacidade de armazenamento de água e alta suscetibilidade à erosão, que reduzem o potencial produtivo destes ambientes (PEREIRA; NETO, 2004). No entanto, a expansão da área cultivada, inevitavelmente, fez com que o cultivo de soja em solos de textura arenosa se tornasse uma realidade e a exploração econômica da soja nesses solos tornou-se um desafio (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2014).

Trabalhos mostram que lavouras com alta produtividade de soja apresentam em média  $10 \text{ mg Kg}^{-1}$  de cobre disponível no solo (VITTI; TREVISAN, 2000), sendo que no Cerrado já estabeleceu-se os níveis mínimos críticos de cobre para a produção de soja, que ficam entre  $0,5$  e  $0,8 \text{ mg}$  de cobre disponível  $\text{Kg}^{-1}$  de solo (GALRÃO, 1999). A deficiência de cobre no solo causa redução do crescimento da planta pelo encurtamento dos internódios e as folhas mais novas assumem a cor verde-acinzentada ou verde-azulada (TAIZ et al., 2017). Sua toxicidade causa aparecimento de pontos necróticos na borda dos folíolos das folhas mais velhas, que progridem para as mais novas (SFREDO; BORKERT, 2004).

O sorgo, *Sorghum bicolor* L., é originário da África Oriental (Etiópia e/ou Sudão) entre 5 a 6 mil anos atrás, sendo difundido por nativos africanos que migravam para vários países do continente (VON PINHO & VASCONCELOS, 2002;). O sorgo é o quinto cereal mais importante do mundo, superado por trigo, arroz, milho e cevada. Por sua versatilidade e facilidade de produção, estima-se que o sorgo tem sido utilizado como alimento básico de mais de 500 milhões de pessoas que vivem em países em desenvolvimento, principalmente da África e da Ásia (MUTISYA et al., 2009). Nesses países, o cereal chega a suprir 70 % da ingestão calórica diária tendo, dessa forma, papel fundamental na segurança alimentar (DICKO et al., 2006a). Desta forma é cultivado em áreas e situações ambientais muito secas e/ou muito quentes, onde a produtividade de outros cereais é antieconômica (AWIKA; ROONEY, 2004).

No Brasil, o uso do sorgo está relacionado principalmente com a alimentação animal, na confecção de rações e no fornecimento como forrageiras (EVANGELISTA, A.R.; PEREIRA, R.C.; ABREU, J.G.; PÈREZ, 2013). Na safra 2017/2018 apresentou área cultivada a nível nacional de 782,2 mil hectares, com produtividade média de  $2731 \text{ Kg ha}^{-1}$ , atingindo produção nacional de 2,1 milhões de toneladas, sendo no Rio Grande Sul, sendo produzido 25

mil toneladas desse grão (CONAB, 2018). Além disso, o sorgo constitui uma cultura adaptada ao processo de ensilagem por sua facilidade de cultivo, alto rendimento e pela qualidade da silagem produzida, além de dispensar o uso de aditivos como forma de melhorar e estimular a fermentação (EVANGELISTA et al., 2003).

O sorgo tem sido uma alternativa a utilização do milho como ingrediente energético, por suas características nutricionais semelhantes. Geralmente apresenta preço inferior e é resistente à seca (MENEZES et al., 2015). Possui maior teor proteico que o milho, porém com menores teores que este último em energia, lisina e metionina (MACIEL et al., 2019a).

As plantas de sorgo apresentam sensibilidade média à deficiência por Cu (SANTOS et al., 2008), porém, a toxidez pode ocasionar branqueamento uniforme, coloração verde-pálida, com nervuras secundárias levemente mais escuras a partir de folhas mais novas. O branqueamento e secamento são progressivos, com enrolamento das laterais do limbo foliar para cima a partir da ponta. Do mesmo modo como ocorre com Mo, pode haver quebra da nervura central com clorose e necrose a partir da ponta da folha, que progride em direção à base da inserção com o colmo, pelas bordas, além de induzir deficiência de ferro. (FILHO, 2016).

## 2.5 FIXADORES DE NITROGÊNIO

O elemento mais importante para elevadas produções na agricultura tropical é o nitrogênio, que compõe 80% da atmosfera na forma de  $N_2$ , mas que está indisponível para as plantas (DÖBEREINER, 1993). Na natureza, alguns organismos procaríotos conseguem assimilar o N atmosférico e transformá-lo em  $NH_3$ , processo chamado de fixação biológica, realizado através do complexo enzimático nitrogenase (SPATZAL et al., 2016). A fixação biológica pode ser responsável por aproximadamente 65% do total de N fixado na Terra, sendo, considerado o segundo processo biológico mais importante depois da fotossíntese (REPKE et al., 2013).

A capacidade de fixar nitrogênio simbioticamente é encontrada em vários grupos de microrganismos e, em alguns casos, observa-se a formação de estruturas diferenciadas. Durante a sua associação com leguminosas, são observadas estruturas chamadas nódulos. Esses microrganismos são tipicamente hábeis para invadir as raízes de plantas leguminosas de zonas temperadas e tropicais, fazendo com que ocorra a formação do nódulo, que é a estrutura

na qual ocorre a fixação do nitrogênio atmosférico (LOPES, 1998; SOARES et al., 2006). Atualmente, são conhecidos seis gêneros de diazotróficas da família Rhizobiaceae: *Azorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Rhizobium*, *Sinorhizobium*, *Mesorhizobium* e *Allorhizobium* (MARIN et al., 1999).

Dentre os microrganismos fixadores de N encontrados em associações com raízes de gramíneas, as espécies do gênero *Azospirillum* constituem um dos grupos mais estudados (REPKE et al., 2013). Algumas bactérias fixadoras possuem vida livre, e podem se associar com gramíneas (MOREIRA et al., 2010). Há relatos de associação de *Azospirillum brasilense* com diversas poáceas, como milho, trigo, sorgo e arroz (VOGEL, 2014). Nessa simbiose não ocorre a colonização dos tecidos vegetais pela bactéria e nem a formação de uma estrutura especializada para a fixação do nitrogênio (LOPES, 1998). Trabalhos realizados com trigo em associação com *Azospirillum* evidenciaram que as bactérias se ligam à superfície externa da raiz para colonizar a rizosfera (VINHAL-FREITAS; RODRIGUES, 2010).

Estudos tem demonstrado que além da capacidade de fixar N<sub>2</sub>, o *Azospirillum* também possui outras propriedades, que resultam na promoção do crescimento vegetal. Uma das principais propriedades está baseada na síntese de fito-hormônios e outros compostos, incluindo auxina, citocinina, giberelina, ácido abscísico, etileno e ácido salicílico (PEDRAZA, 2008). Esses hormônios afetam diretamente o crescimento das raízes, melhorando a absorção de umidade e nutrientes. Há relatos de *Azospirillum* ajudando na mitigação de estresses abióticos, como salinidade e seca e aliviam os efeitos de compostos excessivos e metais pesados (FUKAMI; CEREZINI; HUNGRIA, 2018). O ganho com *Azospirillum spp.* contempla além do que simplesmente auxiliar na fixação biológica do nitrogênio, interferindo também no aumento da superfície de absorção das raízes da planta e, conseqüentemente, no aumento do volume de substrato do solo explorado (MILLÉO; CRISTÓFOLI, 2016). Pesquisas recentes comprovam que a inoculação com *Azospirillum brasilense* proporciona melhor nutrição e desenvolvimento, com reflexo positivo na produtividade de grãos de milho (SOUZA et al., 2019). A inoculação de sementes de sorgos com a bactéria *Azospirillum brasilense* aumenta a produção de massa seca vegetal para ensilagem, independentemente da cultivar utilizada (NAKAO et al., 2018).

## 2.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADEA. S. A. L. et al. Biochemical and physiological changes in jack bean under mycorrhizal symbiosis growing in soil with increasing Cu concentrations. **Environmental and Experimental Botany**, v. 68, n. 2, p. 198–207, 2010.
- ANDREAZZA. R. et al. Chemosphere Bacterial stimulation of copper phytoaccumulation by bioaugmentation with rhizosphere bacteria. **Chemosphere**, v. 81, n. 9, p. 1149–1154, 2010.
- ANDREAZZA. R. et al. Biorremediação de áreas contaminadas com cobre. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 36, n. 2, p. 127–136, 2013.
- ARAÚJO. W. S. DE. Influência das propriedades físicas e químicas de dolos intemperizados na adsorção de chumbo, cobre e zinco. **Floresta e Ambiente**, v. 7, n. 1, p. 167–180, 2000.
- ARAÚJO. W. S. et al. Relação entre adsorção de metais pesados e atributos químicos e físicos de classes de solo do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 17–27, 2002.
- AWIKA. J. M.; ROONEY. L. W. *Sorghum* phytochemicals and their potential impact on human health. **Phytochemistry** 65, v. 65, n. 1, p. 1119–1221, 2004.
- BAKER. B. Y. A. J. M. Metal tolerance. **New Phytol**, v. 106, p. 93–111, 1987.
- BASSO. J. B.; KIANG. C. H. Coeficiente de distribuição (kd) de cobre, potássio e cloreto em solos residuais do subgrupo itararé no estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 1, p. 117–133, 2017.
- BERTONI. J.; LOMBARDI NETO. F. Conservação do solo. 8.ed. São Paulo: Ícone. 2012. 355p. CDA - Coordenadoria de Defesa Agropecuária do Estado de São Paulo. Conservação do Solo. Campinas: CDA. 2014.
- BETTIOL. W.; CAMARGO. O. A. DE. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente. 2006.
- BRADL. H. B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 277, n. 1, p. 1–18, 2004.
- BRADY. N.; WEIL. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**.
- CARNEIRO. M. A. C.; SIQUEIRA. J. O.; MOREIRA. F. M. S. Estabelecimento de plantas herbáceas em solo com contaminação de metais pesados e inoculação de fungos micorrízicos arbusculares. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 12, p. 1443–1452, 2001.
- CENTENO. L. et al. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31–37, 2017.
- CONAB. **Série Histórica de Produção**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>>. Acesso em: 20 fev. 2019.

- CONAMA. **Resolução nº 420. de 28 de dezembro de 2009.** Disponível em: <<http://sapotecsul.com.br/sapotec/DOWNLOADS/CONAMA420.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2019.
- DICKO. M. H. et al. Sorghum Grain as Human Food in Africa: Relevance of Starch Content and Amylase Activities. **African Journal of Biotechnology**, v. 5, n. 5, p. 384–395, 2006.
- DÖBEREINER. J. A importância da fixação biológica de nitrogênio para a agricultura sustentável. **EMBRAPA**. p. 48–49. 1993.
- EVANGELISTA. A.R.; PEREIRA. R.C.; ABREU. J.G.; PÈREZ. J. R. O. Forragens para Ovinos. In: **Volumosos na Produção de Ruminantes: Valor Alimentício de Forragens**. Jaboticabal: Editora Funep. 2013. p. 264.
- EVANGELISTA. A. R. et al. Evangelista. A.R. Pereira. R.C. Abreu. J.G. Pèrez. J.R. O. In: **Volumosos na Produção de Ruminantes: Valor Alimentício de Forragens**. Jaboticabal: Editora Funep. 2003. p. 264.
- FEIX. R. D.; LEUSIN JÚNIOR. S.; AGRANONIK; C. Painel do agronegócio no Rio Grande do Sul. Porto Alegre: FEE. 2016.
- FEPAM. **Portaria FEPAM N.º 85/2014 Dispõe.** Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/legislacao/arq/Portaria085-2014.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2019.
- FERREIRA. P. A. A. et al. Estratégias de amenização da fitotoxidez de metais pesados em solos de vinhedos. In: **Calagem, adubação e contaminação em solos cultivados com videiras**. 7. ed. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho. 2016. p. 111–138.
- FILHO. O. F. DE L. **Toxicidade de Micronutrientes em Sorgo- Sacarino: Diagnose Visual**. Dourados: EMBRAPA. 2016.
- FREEZE. R.A.; CHERRY. J.A. Groundwater. Englewood Cliff. Prentice-Hall. Inc.. New Jersey. 1979.
- FUKAMI. J.; CERZINI. P.; HUNGRIA. M. Azospirillum: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. **AMB Express**. v. 8. n. 73. p. 1–12. 2018.
- GALRÃO. E. Z. Métodos de aplicação de cobre e avaliação da disponibilidade para a soja num latossolo vermelho-amarelo franco-argilo-arenoso fase cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 265–272, 1999.
- GOMES. M. P. et al. Utilização do Salgueiro ( *Salix humboldtiana* Willd ) como espécie fitorremediadora em rejeitos da indústria de Zinco. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 89, p. 117–123, 2011.
- GONÇALVES. M. S. et al. Adequação Dos Modelos De Langmuir E Freundlich Na Adsorção De Cobre Em Solo Argiloso Do Sul Do Brasil. **Holos**, v. 4, p. 37–44, 2013.
- HE. Y. et al. A modelling approach to evaluate the long-term effect of soil texture on spring wheat productivity under a rain-fed condition. **Nature-scientific reports**, v. 4, p. 1–10, 2014.
- HIRAKURI. M. H.; LAZZAROTTO. J. J. **O agronegócio da soja nos contextos mundial e**

**brasileiro**. Londrina: Embrapa Soja. 2014.

JORDÃO. C. P. et al. Adsorção de íons  $\text{Cu}^{2+}$  em latossolo vermelho-amarelo húmico. **Química Nova**, v. 23, n. 1, p. 5–11, 2000.

KONZEN. E. A. **Fertilização de Lavoura e Pastagem com Dejetos de Suínos e Cama de Aves** **Circular Técnica 31**. 2003.

LOPES. A. S. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2. ed. Piracicaba: Potafos. 1998.

LOPES. C. et al. Adsorção de Cu e Zn num Latossolo Vermelho tratado com dejetos suínos. **Revista Ceres**. v. 61. n. 6. p. 997–1005. 2014.

LOURENÇO. K. S. et al. Crescimento e absorção de nutrientes pelo feijoeiro adubado com cama de aves e fertilizantes minerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 462–471, 2013.

MACHADO. S. L. et al. Diagnóstico da contaminação por metais pesados em Santo Amaro-BA. **Engenharia Ambiental e Sanitária**, v. 9, n. 2, p. 140–155, 2004.

MACIEL. M. P. et al. Níveis de proteína em rações com milho ou sorgo para codornas japonesas. **Archivos de Zootecnia**, v. 68, n. 261, p. 110–118, 2019.

MAMEDES. I. M. Influência Da Disposição Inadequada De Resíduos Sólidos Urbanos Sobre O Solo: Estudo De Caso Do Lixão De Várzea Grande-Mt. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 327–336, 2017.

MARIN. V. A. et al. **Fixação Biológica de Nitrogênio: Bactérias Fixadoras de Nitrogênio de Importância para a Agricultura Tropical**. Seropédica: EMBRAPA Agrobiologia. 1999.

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. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 39, n. 8, p. 622–654, 2009.

MARQUES. M.; AGUIAR. C. R. C.; DA SILVA. J. J. L. S. 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.

MATOS. A. T.; FONTES. M. P. F.; MARTINEZ. M. A. Correlação entre os fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão do zinco, cádmio, cobre e chumbo e algumas propriedades físicas dos solos. Engenharia na Agricultura. Viçosa-MG. **Engenharia na Agricultura**, v. 6, n. 4, p. 235–246, 1998.

MCBRIDE. M.; SAUVÉ. S.; HENDERSHOT. W. Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. **European Journal of Soil Science**, v. 48, n. 2, p. 337–346, 1997.

MEDINA. E. F. et al. Seleção de solos da região de viçosa para utilização como barreira química para metais pesados. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 04, n. 3, p. 1–6, 2018.

MENEZES. C. B. DE et al. Adaptabilidade e estabilidade de linhagens de sorgo em ambientes com e sem restrição hídrica. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 14, n. 1, p. 101–115,

2015.

MILLÉO. M. V. R.; CRISTÓFOLI. I. Avaliação da eficiência agrônômica da inoculação de *Azospirillum* sp. na cultura do milho. **Scientia Agraria**, v. 17, n. 3, p. 14–23, 2016.

MONDARDO. D. et al. Adubação Nitrogenada da *Brachiaria brizantha* com Dejeito Líquido Suíno. **Revista Brasileira De Agroecologia**, v. 4, n. 2, p. 3265–3269, 2009.

MOREIRA. C. S.; ALLEONI. L. R. F. Adsorption of Cd, Cu, Ni and Zn in tropical soils under competitive and non-competitive systems. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 3, p. 301–307, 2010.

MOREIRA. F. M. DE S. et al. Bactérias diazotróficas associativas: Diversidade, ecologia e potencial de aplicações. **Comunicata Scientiae**, v. 1, n. 2, p. 74–99, 2010.

MUTISYA. J. et al. Diurnal oscillation of SBE expression in sorghum endosperm. **Journal of Plant Physiology**, v. 166, n. 4, p. 428–434, 2009.

NAKAO. A. H. et al. Intercropping *Urochloa brizantha* and sorghum inoculated with *Azospirillum brasilense* for silage. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 49, n. 3, p. 501–511, 2018.

PEDRAZA. R. O. Recent advances in nitrogen-fixing acetic acid bacteria. **International Journal of Food Microbiology**, v. 125, n. 1, p. 25–35, 2008.

PEREIRA. L. C.; NETO. L. **Avaliação da aptidão agrícola das terras: proposta metodológica**. Jaguariúna: Ambiente. Embrapa meio. 2004.

PETRONIO. B. M. et al. Characterization of the Liquid Phase of Sewage Sludge . Effects on Copper ( II ) Adsorption by Soil. **Environmental Technology**, v. 17, p. 439–444, 1996.

PIRES. A. M. M.; ANDRADE. C. A. DE; COSCIONE. A. R. Metais pesados em lodo de esgoto. In: **SPADOTTO. C.. RIBEIRO. W. (Ed). Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. Botucatu: FEPAF. 2006. p. 2056–232.

REPKE. R. A. et al. Eficiência da *Azospirillum brasilense* combinada com doses de nitrogênio no desenvolvimento de plantas de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 12, n. 3, p. 214–226, 2013.

ROBINSON. B. et al. Phytoextraction : an assessment of biogeochemical and economic viability. **Plant and Soil**, v. 249, p. 117–118, 2003.

RODRIGUES. A. C. D. et al. Mecanismos de Respostas das Plantas à Poluição por Metais Pesados: Possibilidade de Uso de Macrófitas para Remediação de Ambientes Aquáticos Contaminados. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 1, p. 262–276, 2016.

RONQUIM. C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. 1. ed. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. 2010. v. 1

SALAM. A. K.; HELMKE. P. A. The pH dependence of free ionic activities and total dissolved concentrations of copper and cadmium in soil solution. **Geoderma**, v. 83, n. 3–4, p. 281–291, 1998.

- SÁNCHEZ-PARDO. B.; FERNÁNDEZ-PASCUAL. M.; ZORNOZA. P. Copper microlocalisation and changes in leaf morphology. chloroplast ultrastructure and antioxidative response in white lupin and soybean grown in copper excess. **Journal of Plant Research**, v. 127, n. 1, p. 119–129, 2014.
- SANTOS. H. C. et al. Cu e Zn na cultura do sorgo cultivado em três classes de solos . I . Crescimento vegetativo e produção. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 125–130, 2009.
- SFREDO. G. J.; BORKERT. C. M. **Deficiências e toxicidades de nutrientes em plantas de soja**. Londrina: Embrapa Soja. 2004.
- SILVEIRA. M. L. A. et al. Energia livre da reação de adsorção de cádmio em latossolos ácidos. **Scientia Agrícola**, v. 56, n. 4, p. 1117–1122, 1999.
- SOARES. A. L. DE L. et al. Eficiência agrônômica de rizóbios selecionados e diversidade de populações nativas nodulíferas em perdões (MG). II - Feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 30, n. 5, p. 803–811, 2006.
- SODRÉ. F. F.; LENZI. E.; DA COSTA. A. C. S. Utilização de modelos físico-químicos de adsorção no estudo do comportamento do cobre em solos argilosos. **Quimica Nova**, v. 24, n. 3, p. 324–330, 2001.
- SOUZA. E. M. DE et al. Does the nitrogen application associated with Azospirillum brasilense inoculation influence corn nutrition and yield ? **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 53–59, 2019.
- SPATZAL. T. et al. **Nitrogenase FeMoco investigated by spatially resolved anomalous dispersion refinement**. [s.l.] Nature Publishing Group. 2016. v. 7
- SPOSITO. G. **The chemistry of soils**. NEW WORK: OXFORD UNIVERSITY PRESS. 2008.
- TAIZ. L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: [s.n.].
- VINHAL-FREITAS. I. C.; RODRIGUES. M. B. Fixação biológica do nitrogênio na cultura do milho. **Agropecuária Técnica**, v. 31, n. 2, p. 143–154, 2010.
- VITTI. G. C.; TREVISAN. W. Manejo de macro e micronutrientes para alta produtividade da soja. **Potafos**. p. 1–16. 2000.
- VOGEL. G. F. 2014 - Efeitos da utilização de Azospirillum brasiliense em poaceas forrageiras. **Agropecuária Científica no Semi-Árido**, v. 10, n. 1, p. 1–6, 2014.
- VON PINHO. R. ; VASCONCELOS. R. C. DE. **Cultura do sorgo**. Lavras: UFLA. 2002.
- YRUELA. I. Copper in plants: Acquisition. transport and interactions. **Functional Plant Biology**, v. 36, n. 5, p. 409–430, 2009.
- YRUELA. I. Transition metals in plant photosynthesis. **Metallomics**. v. 5. n. 9. p. 1090–1109. 2013.

ZANCHETA. A. C. F. et al. Fitoextração de cobre por espécies de plantas cultivadas em solução nutritiva. **Bragantia**, v. 70, n. 4, p. 737–744, 2011.

### **3. CAPÍTULO 1 - DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS AGRÍCOLAS CULTIVADAS EM SOLO COM DIFERENTES TEXTURAS E TEORES DE COBRE**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

O cobre é um metal usado amplamente nas áreas industriais e agrícolas, acrescido ao solo a partir da disposição de resíduos sólidos industriais ou domésticos, uso de agroquímicos, dejetos de animais, efluentes e fertilizantes fosfatados. O uso destes componentes continuamente na agricultura pode causar o acúmulo de cobre no solo, tornando-o tóxico às plantas, aos animais e ao homem (PEZZAROSSA et al., 1990). Esses elementos podem expressar seu potencial poluente diretamente nos organismos do solo, pela disponibilidade às plantas em níveis fitotóxicos, além da possibilidade de transferência para a cadeia alimentar, por meio das próprias plantas, ou pela contaminação das águas de superfície e subsuperfície (SOARES et al., 2005).

Nas plantas, o cobre atua como ativador de enzimas que participam nas reações de oxirredução, nos processos fisiológicos como fotossíntese, respiração, translocação de açúcares, fixação biológica do nitrogênio, redução do nitrato, metabolismo de proteínas, formação de parede celular, síntese de DNA e RNA, aumentando a resistência das plantas a moléstias (MARSCHNER, 2012a). Porém, em excesso no solo, o cobre causa sintomas de toxicidade, redução da fotossíntese, clorose, necrose, nanismo, inibição do crescimento das raízes e folhas e distúrbios na estrutura das proteínas (YRUELA, 2009). As concentrações dos metais pesados variam nos diferentes tecidos da planta, e, em geral, os grãos contêm concentração menor do que as partes vegetativas da planta (BETTIOL; CAMARGO, 2006). O cobre é absorvido na forma iônica e sua translocação dentro das plantas ocorre tanto no xilema quanto no floema, onde o metal está circundado por compostos orgânicos nitrogenados, tais como aminoácidos (BAKER, 1990). Contudo, é um elemento relativamente imóvel nas plantas, assim, folhas verdes podem acumular altas concentrações de cobre e subsequentemente não liberá-lo para folhas mais novas e outros tecidos, tais como inflorescências.

Os solos apresentam diferentes formas de disponibilizar seus elementos minerais para as plantas, o que dependerá do teor disponível de nutrientes, resultado do intemperismo das rochas, do pH da solução e das propriedades químicas e físicas do solo, em especial da

quantidade de argila e matéria orgânica, no caso dos micronutrientes (SANTOS et al., 2008). O teor de argila é um dos principais fatores responsáveis pela variação da adsorção de cobre em horizontes superficiais em Latossolos e Argissolos brasileiros, indicando que a formação de complexos de esfera interna seja o principal mecanismo de adsorção para este metal (SILVEIRA et al., 2002).

A soja (*Glycine max* L.) representa a leguminosa mais cultivada no mundo, sendo originária da Ásia. Destaca-se pela crescente produção de grãos que são utilizados tanto na dieta humana quanto na alimentação animal (SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015). O Brasil está em segundo lugar no ranking mundial da produção da soja, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. Os grandes responsáveis pela significativa produção de soja brasileira são os estados do Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul (CONAB, 2018). No Rio Grande do Sul, a soja começou a ganhar destaque comercial por volta de 1960, com a finalidade de realizar rotação de cultura com cultivos de inverno nas propriedades da região de Santa Rosa (POZZEBON et al., 2018). Ainda no estado, a área de cultivo atual estimada é de aproximadamente 5, 692 milhões de hectares na safra 2017/2018 com expectativa de produção anual de 19,968 milhões de toneladas (CONAB, 2018).

O sorgo (*Sorghum bicolor* L.) é originário da África Oriental (Etiópia e/ou Sudão) entre 5 a 7 mil anos atrás, sendo difundido por nativos africanos que migravam para vários países do continente (VON PINHO; VASCONCELOS, 2002; WALL; ROSS, 1975). A cultura do sorgo no país teve área cultivada de 621,9 mil hectares e produtividade de 2.667 kg/ha na safra 2016/2017 (CONAB, 2018). O sorgo é o quinto cereal mais importante do mundo, superado por trigo, arroz, milho e cevada. Por sua versatilidade e facilidade de produção, estima-se que o sorgo tem sido utilizado como alimento básico por mais de 500 milhões de pessoas que vivem em países em desenvolvimento, principalmente da África e da Ásia (MUTISYA et al., 2009), chegando a suprir 70 % da ingestão calórica diária, tendo papel fundamental na segurança alimentar (DICKO et al., 2006b).

A influência da contaminação com cobre em solo sob diferentes texturas no desenvolvimento da cultura da soja e do sorgo. Com isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar desenvolvimento de plantas agrícolas cultivadas em solo com diferentes texturas e teores de cobre

### 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado e conduzido em ambiente protegido, casa de vegetação pertencente ao departamento de Engenharia Florestal do Campus da UFSM Frederico Westphalen, RS, sendo utilizado um único tipo de solo, com alto teor de argila, no qual foi misturado diferentes quantidades de areia, possibilitando desta forma a elaboração de solos com diferentes porcentagens de argila.

O solo utilizado no experimento foi coletado em horizonte superficial (horizonte A) caracterizado como Latossolo Vermelho aluminoférrico (SANTOS, 2013). Após a coleta, o solo foi secado em estufa com aeração forçada a  $65\pm 1^\circ\text{C}$ , moído e peneirado em malha de 2 mm, sendo analisado no laboratório de química do solo e conforme metodologia descrita por Mann e Ritchie, (1993) para o cobre trocável (extrator KCl  $0,005\text{ mol L}^{-1}$ ) e Tedesco et al., (1995) para os demais elementos tanto para o solo quanto para a areia utilizada no experimento, cujas características físicas e química são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Textura e análise química dos solos construídos utilizado para cultivo da cultura da soja e sorgo.

----- Atributo -----								
Textura	pH	MO	P	K	Mg	Al+H	Cu	Zn
%	01:01	%	-----mg/dm <sup>3</sup> -----			mg/dm <sup>3</sup>		
70	5,98	0,9	0,72	26,44	2,56	2,09	8,8	0,52
52,5	5,99	0,88	0,8	22,86	1,82	1,91	7,2	0,58
35	6,05	0,8	0,86	20,68	1,37	1,87	6,9	0,62
17,5	5,95	0,76	0,9	16,7	0,57	1,78	6,4	0,7

No sentido de elaborar solos com diferentes teores de argila, seguiu-se a metodologia proposta por Gatiboni et al., (2014). O solo utilizado continha inicialmente 70% de argila, para a elaboração das diferentes texturas foram realizadas misturas de areia e solo, sendo adicionado areia nas proporções de: 75, 50, 25 e 0 (zero). Ao final deste processo os solos elaborados apresentaram teores de 17.5, 35, 52.5 e 70 % de argila, respectivamente.

Após o estabelecimento das texturas do solo realizou-se análise química dos mesmos, evidenciando-se a necessidade de calagem para cada solo. Em cada textura de solo foi

adicionado calcário para atingir pH em água de 6.5 e após este procedimento os solos foram incubados por 45 dias. Durante a incubação das diferentes texturas, os solos foram acondicionados em vasos e a umidade mantida em 80 % da capacidade de campo, para estabilização de propriedades físico-químicas desses solos artificiais. Após a incubação foi realizado a contaminação dos solos. As doses de cobre foram aplicadas 30 dias antes da semeadura das sementes de soja e sorgo, na forma de solução de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), sendo homogeneizados no solo por agitação em saco plástico.

A cultivar de soja utilizada foi BRASMAX RAI0 50I52RSF IPRO e a cultivar de sorgo foi o híbrido TAMBO BMR. Para o cultivo das plantas em casa de vegetação foi utilizado vasos plásticos com capacidade de 5 litros preenchidos com 5kg de solo. Na primeira quinzena de setembro foi feita a semeadura das duas culturas, assim, em cada vaso foi semeado 8 sementes de cada cultura, sendo realizado o desbaste oito dias após a germinação, deixando uma planta por vaso até o final do experimento, sendo o final do ciclo produtivo das culturas estudadas. A irrigação foi realizada diariamente com água por meio de um sistema de gotejamento, mantendo a umidade a 80% da capacidade de campo.

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso em arranjo fatorial (7 x 4), sendo sete doses de cobre (0 (zero), 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre  $\text{Kg}^{-1}$ ) quatro texturas de solo (17.5, 35, 52.5 e 70 % de argila), com cinco repetições. Foram conduzidos dois experimentos concomitantes, um com a cultura do sorgo e outro com a cultura da soja.

A determinação do índice relativo de clorofila (IRC) das folhas foi realizada por meio de clorofilômetro portátil (ClorofiLOG®, Falker, Porto Alegre, modelo CFL 1030) (FALKER, 2008), que fornece resultados em unidades adimensionais chamados valores de IRC e trabalha com leituras em dois comprimentos de onda. Mensurou-se o IRC na folha superior totalmente expandida na cultura do sorgo e na folha central do último trifólio, executando-se três leituras por folha, aos 60 dias após a semeadura das culturas.

Ao final do ciclo das culturas foram quantificados: altura de planta medida da distância a partir da superfície do solo até a última vagem na haste principal da planta (AP em cm) para a soja e para o sorgo foi medido a altura do nível do solo até a ponta da folha bandeira; o diâmetro do colo (DC), com paquímetro digital (®Black Jack) na região do hipocótilo da planta; volume de raiz (VR), com auxílio de uma proveta graduada; massa seca radicular (MSR) e da parte aérea (MSPA), sendo a planta seccionada na região do colo e ambas as partes secas em estufa a  $65 \pm 1$  °C até massa constante e pesadas em balança analítica.

Após a coleta das plantas, as raízes foram separadas do solo por meio de lavagem com água e com auxílio de peneiras de 0,5 e 1,0 mm de malha, a separação da parte aérea e radicular foi por meio de corte na região do hipocótilo, sendo avaliado a área superficial específica (ASE) das raízes, conforme Tennant, (1975). As raízes foram digitalizadas, volume, número de fibras e o comprimento radicular total de cada planta foram estimados por meio do programa SAFIRA (JORGE; RODRIGUES, 2008).

Posteriormente as raízes e a parte aérea foram moídas em moinho tipo Wiley com peneira de malha de 10 mesh para a determinação dos teores de cobre (Cu) na parte aérea e nas raízes, através de digestão nítrico-perclórica (3:1) e determinação em espectrofotometria de absorção atômica, conforme descrito por Miyazawa et al., (2009) e determinado o Cu total nos tecidos das plantas (Figura 1 e 2) e a determinação dos teores de cobre pseudo-total no solo foi realizada conforme metodologia 3050b descrita em USEPA (1996), este método não é uma técnica de digestão total para a maioria das amostras, assim, esta digestão ácida dissolve quase todos os elementos que podem se tornar "ambientalmente disponíveis", sendo que os elementos ligados em estruturas de silicato não são normalmente dissolvidos por este método, por consequência os resultados obtidos através deste método são denominados de valores "pseudo-totais".

Os resultados foram submetidos a análise de variância através do Software "Statistical Analysis System" (SAS, 2000) e, quando houve interação significativa foram desmembrados os efeitos das doses dentro de cada textura testada, por meio de regressão polinomial. Quando não significativo desdobrou-se os efeitos simples, sendo dose por regressão polinomial e textura por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aumento do teor de argila no solo possibilitou um aumento nos teores de cobre pseudo-totais no solo em todas as texturas estudadas (Figura 1 e 2). Os valores ficaram acima dos limites máximos de investigação permitidos pela resolução nº 420, que é de 200 mg kg<sup>-1</sup> (CONAMA, 2013), 2009) e de 203 mg kg<sup>-1</sup> para solos originados de rochas vulcânicas da região do Planalto do estado do Rio Grande do Sul, Brasil (FEPAM, 2014). Desse modo, os valores de cobre presente no solo superam o limite de investigação para áreas agrícolas.

Figura 1 - Teor pseudo-total de cobre em solos com quatro texturas diferentes (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila), no final do cultivo de soja, submetido a doses de cobre (zero 0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo).

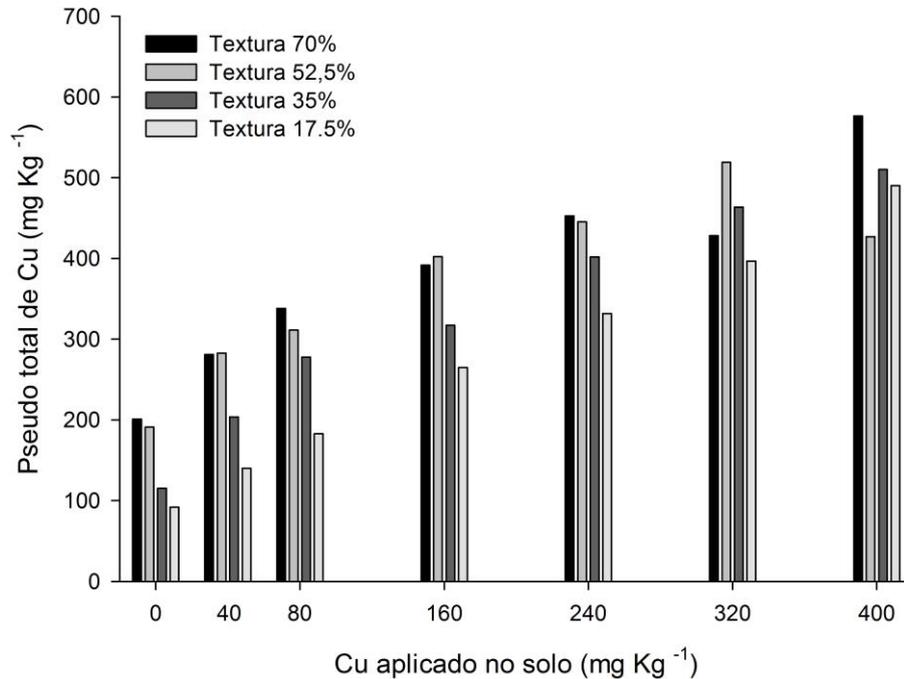
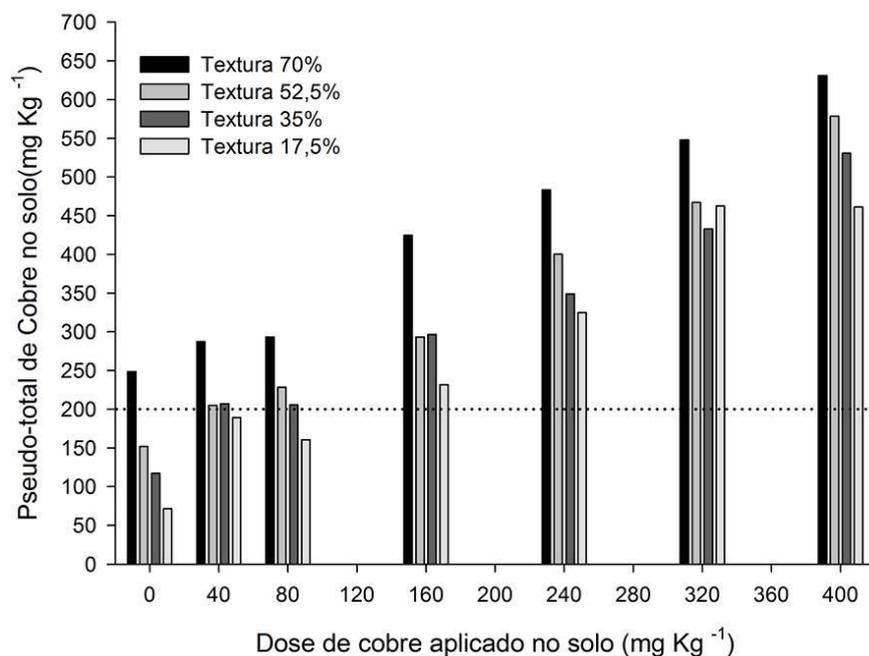


Figura 2 - Teor pseudo-total de cobre em solos com quatro texturas diferentes (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila), no final do cultivo de sorgo, submetido a doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo).



### 3.3.1 Influência da textura do solo e doses de cobre sobre o desenvolvimento da soja

Os resultados evidenciaram interação entre texturas e doses de cobre para altura de planta, diâmetro de colmo e comprimento de raiz da soja, no entanto nenhum grau do polinômio para regressões foi significativo, assim, procedeu-se análise de comparação de médias (Tabela 2). De forma geral em maiores doses de cobre no solo, a altura de planta da cultura da soja tem decréscimos em todas as texturas de solo (Tabela 2). A pesquisa relata que os metais pesados interferem de forma prejudicial no crescimento de espécies vegetais (SOUZA; FRANÇA; FERREIRA, 2011).

Analisando as doses dentro de cada textura (Tabela 2) tem-se que em doses menores de cobre, as texturas mais arenosas com 17,5 e 35 % de argila apresentaram potencial a favorecer a altura da soja, no entanto, a partir da dose de 240 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo fica evidente uma inversão quanto à altura de planta, assim, nas doses mais altas de cobre tem-se médias maiores nos solos mais argilosos (52,5 e 70 % de argila). A altura de plantas diminui com o aumento de cobre no solo, sobretudo em solos mais arenosos, assim, solos com textura de 17,5 e 35 % de argila possibilitam maior potencialidade de fitotoxides por cobre em plantas de soja.

O diâmetro de colmo da cultura da soja apresentou redução com o aumento da dose de cobre no solo nas quatro texturas estudadas (Tabela 2). Ao analisar as texturas dentro de cada dose, verifica-se que nas doses de 0, 40, 80 e 160, as maiores médias de diâmetro de colmo estão nos solos de textura mais arenosos, enquanto nas doses a partir de 240 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  as maiores médias estão nos solos com texturas intermediarias, evidenciando assim um intervalo de textura de solo para cultivo da cultura da soja, possibilitando aumento de diâmetro de colmo em doses altas de cobre em solos mais argilosos.

O aumento da dose de cobre nas quatro texturas estudadas, induziu a diminuição do comprimento radicular da soja, apesar de não expressar diferença significativa, evidencia-se uma potencialidade de que solos mais argilosos possibilitam maior crescimento radicular, contudo, a dose zero demonstra que, com a ausência de aplicação de cobre no solo, a soja apresentou maior comprimento radicular nos solos mais arenosos, sem apresentar diferença significativa entre o teor de argila do solo (Tabela 2). O cobre em altas concentrações, pode causar efeito tóxico, reduzindo o crescimento vegetal (DECHEN; NACHTIGALL, 2006).

Tabela 2 - Altura de planta (AP), diâmetro de colmo (DC) e comprimento de raiz (CR) da cultura da soja cultivado em quatro solos com diferentes texturas (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila), submetido a doses de cobre em mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo (zero (0), 40, 80, 160, 240, 320 e 400).

% de argila no solo	----- Dose de cobre mg kg <sup>-1</sup> -----						
	0	40	80	160	240	320	400
Altura de planta (cm)							
17,5	27,8 a B	28,8 a A	28,8 a A	26,9 a B	27,20 a A	23,57 b B	27,20 a A
35	27,96 a B	28,33 a A	27,2 a A	26,84 a B	28,35 a A	27,70 a A	23,83 b B
52,5	28,33 abc AB	29,20 abc A	29,6 ab A	30,02 a A	26,6 c A	27,15 abc A	27,08 bc A
70	30,62 a A	29,00 a A	29,08 a A	28,46 ab AB	26,00 b A	25,30 bc AB	23,50 bc B
Diâmetro do colmo (mm)							
17,5	2,91 ab A	2,82 abc B	2,99 a A	2,93 ab A	2,77 abc A	2,58 c A	2,73 bc AB
35	2,79 ab A	2,72 ab B	2,67 ab B	2,87 a A	2,79 ab A	2,56 bc A	2,36 c C
52,5	2,88 ab A	2,96 a AB	2,81 ab AB	2,95 ab A	2,72 b A	2,48 c A	2,93 ab A
70	3,01 a A	3,05 a A	2,85 ab AB	3,02 a A	2,77 bc A	2,68 bc A	2,60 c BC
Comprimento de raiz (cm)							
17,5	35,09 ab A	37,48 a A	34,64 ab AB	38,12 a A	29,57 b A	28,84 b A	30,52 b A
35	39,24 a A	34,82 ab A	32,70 bc B	25,12 d B	32,87 abc A	27,24 cd AB	24,93 d A
52,5	36,08 a A	34,00 a A	37,61 a AB	37,13 a A	34,66 a A	21,37 b B	27,52 b A
70	38,24 a A	33,32 ab A	39,03 a A	27,32 bc B	28,74 bc A	28,99 bc A	22,27 c A

\* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Não houve interação significativa para os parâmetros massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raiz (MSR), Clorofila A, B e total da cultura da soja (Tabela 3), havendo apenas efeito simples de doses, no entanto nenhum grau do polinômio para regressões foi significativo, assim, procedeu-se análise de comparação de médias. A massa seca de planta da cultura da soja (Tabela 3) apresentou menores médias na dose de 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo, sendo que esta não difere estatisticamente das doses de 320, 240 e 160 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo, evidenciando a existência de um potencial de redução na massa seca de planta na cultura da soja cultivado em áreas com doses altas de cobre no solo (Tabela 3). A literatura indica que a cultura da aveia apresenta redução drástica em seu crescimento em

doses a partir de 100 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo (SANTOS et al., 2004), assim, deve-se realizar análise prévia a instalação da cultura afim de evitar perdas produtivas oriundas de toxidez por cobre. As médias da MSR da cultura da soja para as doses de 0, 40, 80, 160 e 240 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo não se diferiram pelo teste, na dose de 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo ocorre diminuição na massa seca de raiz na cultura da soja em doses acima de 320 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo. Possivelmente em virtude da toxidez de cobre no crescimento vegetal (ZORTÉA et al., 2016).

Tabela 3 - Massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca raiz (MSR), Clorofila A, B e Total da cultura da soja submetida a diferentes doses de cobre.

Doses de cobre	0	40	80	160	240	320	400
MSPA (g)	1,000 a	0,985 ab	0,979 ab	0,804 bc	0,686 c	0,609 c	0,660 c
MSR (g)	0,280 ab	0,272 ab	0,298 a	0,259 abc	0,245 abc	0,221 bc	0,206 c
Clorofila A	34,482 a	32,559 ab	32,529 ab	31,081 abc	29,475 bcd	28,388 cd	25,879 d
Clorofila B	42,053 a	40,253 a	40,665 a	37,800 ab	37,063 ab	34,412 bc	30,907 c
Clorofila Total	76,535 a	72,812 a	73,224 a	68,881 ab	66,538 ab	62,8 bc	56,786 c

\*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05). Fonte: Autor (2019).

Referente a clorofila A nas folhas de soja, a dose de 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo apresentou a menor média, porém não diferiu estatisticamente das doses de 240 e 320, sendo que as doses de 0, 40, 80 e 160 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo apresentaram as maiores médias não diferindo estatisticamente (Tabela 3). A clorofila B apresentou as menores médias também na dose de 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup>, não diferindo estatisticamente da dose de 320, já as doses de 0, 40 e 80, 160 e 240 apresentaram as maiores médias (Tabela 3). O cobre pode apresentar efeito destrutivo na integridade das membranas dos cloroplastos (TAIZ et al., 2017), o que pode ocasionar perdas de potencial produtivo nas plantas cultivadas (MOCQUOT et al., 1996), assim, com base nos resultados encontrados no presente trabalho, pode-se inferir que o cobre em doses altas no solo diminui o conteúdo de clorofila e por consequência a fotossíntese.

A clorofila total evidenciou em suas médias uma superioridade nas doses de 0, 40 e 80, 160 e 240 mg de cobre kg<sup>-1</sup>, evidenciando-se que a partir da dose de 320 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo tem-se uma diminuição no teor de clorofila total na cultura da soja, sobretudo para a dose máxima estudada (Tabela 3). A redução do conteúdo de clorofila ocasiona

simultaneamente um decréscimo na fotossíntese líquida (ÖNCEL; KELES; ÜSTÜN, 2000) e, conseqüentemente, o crescimento das plantas é reduzido (ARAÚJO; MONTEIRO; CARDOSO, 2005). Assim, doses superiores a 320 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo diminuem o teor de clorofila total.

Não houve interação significativa para os parâmetros número de grãos por planta, massa seca de planta e massa seca de raiz da cultura da soja. No entanto, houve efeito simples das texturas estudadas para ao número de grãos por planta, massa seca da raiz e massa seca de planta (Tabela 4). Solos com textura mais arenosa possibilitaram maior produção de massa seca de grãos e parte aérea, pela maior disponibilidade de nutrientes nestes solos (CENTENO et al., 2017), considerando que durante a condução do presente experimento, foi utilizado a mesma adubação em todos os tratamentos.

Tabela 4 – Massa de grãos (MG), massa seca de planta (MSPA) e massa seca de raiz (MSR) da cultura da soja, cultivada em diferentes texturas de solo.

Textura do solo	MG (g)	MSPA (g)	MSR (g)
17,5	2,0 b	0,76 bc	0,28 a
35	1,8 b	0,71 c	0,26 ab
52,5	2,2 ab	0,87 ab	0,25 ab
70	2,6 a	0,94 a	0,23 b

\* Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey (P <0,05). Fonte: Autor (2019).

Para o volume de raiz, área superficial específica radicular e diâmetro médio de raízes de soja houve interação entre texturas e doses de cobre, no entanto, nenhum grau do polinômio para regressões foram significativos, assim, procedeu-se análise de comparação de médias (Tabela 5). No volume e área superficial de raiz ocorreu diminuição destes parâmetros com o aumento da dose de cobre no solo, e para doses de 0, 40, 80 e 160 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo as maiores médias se concentram nos solos com textura mais arenosa, enquanto o diâmetro médio de raízes diminui com o aumento das doses de cobre para todas as texturas estudadas. A redução do crescimento radicular é um dos sintomas mais evidentes do efeito tóxico do cobre (KUKKOLA; RAUTIO; HUTTUNEN, 2000).

Raízes mais finas apresentam geometria mais favorável para absorção de nutrientes cujo principal mecanismo de transporte é a difusão (BARBER, 1984) e raízes grossas, embora

com superfície maior, favorecem o transporte por fluxo de massa (ROSOLEM et al., 2003), sendo que volume, área superficial específica e diâmetro médio do sistema radicular estão relacionadas à capacidade de aquisição de nutrientes e água pelas plantas (BOUMA; NIELSEN; KOUTSTAAL, 2000). A aplicação de cobre no solo pode causar diminuição no diâmetro médio de raízes da soja, assim a adição de cobre no solo diminuiu o potencial da soja em absorver nutrientes e água do solo, causando uma menor produção da cultura.

Tabela 5 – Volume, área superficial e diâmetro médio de raízes de soja cultivado em solos com diferentes texturas e doses de cobre.

	0	40	80	160	240	320	400
Texturas %	Volume do sistema radicular (mm <sup>3</sup> )						
17,5	1848 a B	1598 a AB	1533 ab A	1605 a A	805 A	842 bc B	552 c A
35	1392 ab B	2081 a A	1095 b AB	1065 b AB	1231 b A	1027 b B	791 b A
52,2	3220 a A	1196 b B	1053 bc AB	439 c B	700 bc A	2777 a A	325 c A
70	1690 ab B	1988 a A	741 c B	754 c B	878 c A	1127 bc B	500 c A
	Área superficial específica (mm <sup>2</sup> )						
17,5	6416 a A	6398 a A	5837 a A	6268 a A	3365 b A	2753 b B	1897 b A
35	5061 a B	5293 a AB	4109 ab AB	2709 b BC	5230 a A	3664 ab B	2892 b A
52,2	10287 a B	4225 c B	3615 cd B	1567 e C	3246 cde A	7188 b A	1862 de A
70	4896 ab B	6324 a A	3865 bc AB	3717 bc B	3941 bc A	3736 bc B	2390 c A
	Diâmetro médio (mm)						
17,5	0,79 a A	0,68 b A	0,71 ab A	0,66 b A	0,68 b A	0,67 b B	0,64 b A
35	0,74 a AB	0,73 a A	0,69 a A	0,69 a A	0,71 a A	0,69 a AB	0,71 a A
52,2	0,81 a A	0,79 ab A	0,70 bc A	0,62 c A	0,62 c A	0,79 ab A	0,65 c A
70	0,68 b B	0,83 a A	0,54 c B	0,52 c B	0,65 b A	0,66 b B	0,52 c B

\* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro.

### 3.3.2 Influência da textura do solo e doses de cobre sobre o desenvolvimento do Sorgo

Para as variáveis diâmetro do colmo, altura de planta e número de perfilhos as doses acima de 160 (mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo) começam a afetar de forma negativa diminuição o seu potencial produtivo (Tabela 6). Estes parâmetros tem correlação positiva com a produção

de matéria seca e de grãos desta cultura (CECCON et al., 2018), isto implica em restrições produtivas da cultura em solos contaminados com cobre.

Tabela 6 - Diâmetro do colmo, altura de planta, número de perfilhos e volume de raiz de sorgo, cultivado em diferentes doses de cobre no solo (mg de cobre kg<sup>-1</sup>),

Doses de cobre	Diâmetro do colmo (mm)	Altura de planta (cm)	Número de perfilhos planta <sup>-1</sup>	Volume de raiz (cm <sup>3</sup> )
0	12,46 a	77,44 a	2,05 a	2,04 abc
40	11,75 ab	81,02 a	1,80 abc	1,44 bc
80	12,75 a	85,10 a	1,85 ab	3,31 a
160	11,23 ab	76,23 a	1,47 abc	2,77 a
240	9,01bc	72,26 ab	1,26 bc	1,01 c
320	7,94 c	59,70 bc	1,05 c	2,57 ab
400	7,07 c	52,15 c	1,05 c	0,78 c

\* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05), Fonte: Autor (2019),

O volume de raiz do sorgo foi reduzido com o aumento das doses de cobre no solo (Tabela 6). O volume de raízes teve seus maiores valores absolutos nas doses de 80 e 160, evidenciando um intervalo em que o volume de raiz do sorgo aumenta com a presença de cobre no solo, efeitos semelhantes foram encontrados por (BOCHICCHIO et al., 2015; MARSCHNER, 2012b) no sistema radicular de *Arabidopsis thaliana*, portanto, as modificações no sistema radicular são influenciadas pela disponibilidade de cobre no solo.

Os parâmetros clorofila A, B e total de sorgo (Tabela 6) não apresentaram interação significativa entre doses e texturas, apresentando diferença significativa para efeito simples de doses de cobre (Tabela 7) e texturas de solo (Tabela 8), Clorofila A, B e total de sorgo (Tabela 7) apresentaram incrementos em seus valores até a dose de 80 mg de cobre kg<sup>-1</sup> e acima desta dose diminuindo suas médias, a diferença significativa concentrou-se principalmente nas doses de 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup>, assim a aplicação de doses acima de 240 mg de cobre kg<sup>-1</sup> solo apresenta potencial de diminuir a produção de fitomassa do sorgo, apesar do cobre (Cu) ser um micronutriente essencial aos vegetais, atuando como elemento estrutural das proteínas, mitocôndrias e cloroplastos, bem como na resposta ao stress oxidativo (BURKHEAD et al., 2009; GARCIA-MOLINA et al., 2011; GARCIA; WELCHEN; GONZALEZ, 2014; YRUELA, 2009), quando presente em concentrações altas tornar-se fitotóxico para as plantas, interferindo em inúmeros processos fisiológicos

(GAUTAM; ANJANI; SRIVASTAVA, 2016), alterando a fotossíntese, síntese de pigmentos fotossintéticos, provocando forte inibição no desenvolvimento da planta (ADREES et al., 2015).

Tabela 7 - Médias de clorofila A, B e total do Sorgo cultivado com diferentes doses de cobre no solo.

Doses	Clorofila A	Clorofila B	Clorofila total
0	33,11 a	8,23 abc	41,34 ab
40	33,40 a	8,60 ab	42,01 ab
80	33,57 a	9,00 a	42,57 a
160	31,98 ab	8,25 abc	40,23 abc
240	30,27 ab	7,55 bc	37,83 bc
320	29,58 b	7,22 c	36,80 c
400	29,57 b	7,04 c	36,62 c

\* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ), Fonte: Autor (2019).

Tabela 8 - Médias de clorofila A, B e total de Sorgo, cultivado em diferentes texturas de solo.

Texturas	Clorofila A	Clorofila B	Clorofila total
17,5	30,41 a	7,35 b	37,77 b
35	31,65 a	7,99 ab	39,65 ab
52,5	32,62 a	8,23 a	40,86 a
70	31,81 a	8,38 a	40,19 ab

\* Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ), Fonte: Autor (2019).

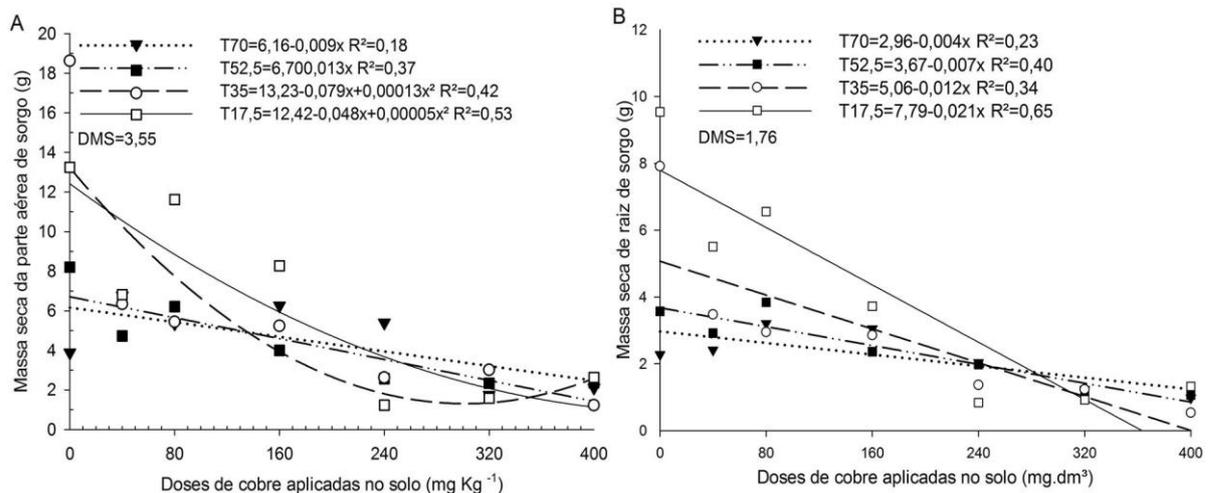
A análise de clorofila B e total apresentaram maiores médias quando o sorgo foi cultivado em solos mais argilosos (Tabela 8), considerando que, menores teores de clorofila diminuem o potencial produtivo da cultura (MARQUES et al., 2018), com isso pode-se inferir que o cultivo de sorgo em solos arenosos ocasionou redução na biomassa do sorgo.

As texturas mais argilosas (52,5 e 70 % de argila) possibilitaram redução linear na massa seca de parte aérea do sorgo em função das doses de cobre aplicadas (Figura 3A). Algumas pesquisas demonstram que a produção de matéria seca da parte aérea de plantas é

muito influenciada pela contaminação do solo por metais pesados (MARQUES; SIQUEIRA; OSWALDO, 2000).

Nas texturas mais arenosas (17,5 e 35 % de argila) o sorgo respondeu de forma quadrática negativa com as doses de cobre no solo, apresentando ponto de mínima de 480 e 303 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  solo respectivamente (Figura 3 A). A produção de biomassa está associada à tolerância da cultura ao contaminante, possibilitada por adaptações bioquímicas que permitem tolerar concentrações elevadas desses elementos (TAIZ et al., 2017), deste modo as resposta quanto a MSPA de sorgo deu-se pelo aumento no teor de cobre no solo pela relação entre dose aplicada e pseudo total no solo (Figura 3), apesar da resposta diferenciada do sorgo quanto a MSPA nos diferentes solos estudados, evidenciou-se que o acréscimo de cobre no solo diminui a MSPA de sorgo, o que deve acarretar em perda produtiva da cultura (AQUINO et al., 2007).

Figura 3 - Equações de regressão para massa seca da parte aérea (A) e raiz (B) de sorgo cultivado em quatro texturas de solo (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila) e doses de cobre em  $\text{mg}$  de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo (zero (0), 40, 80, 160, 240, 320 e 400).

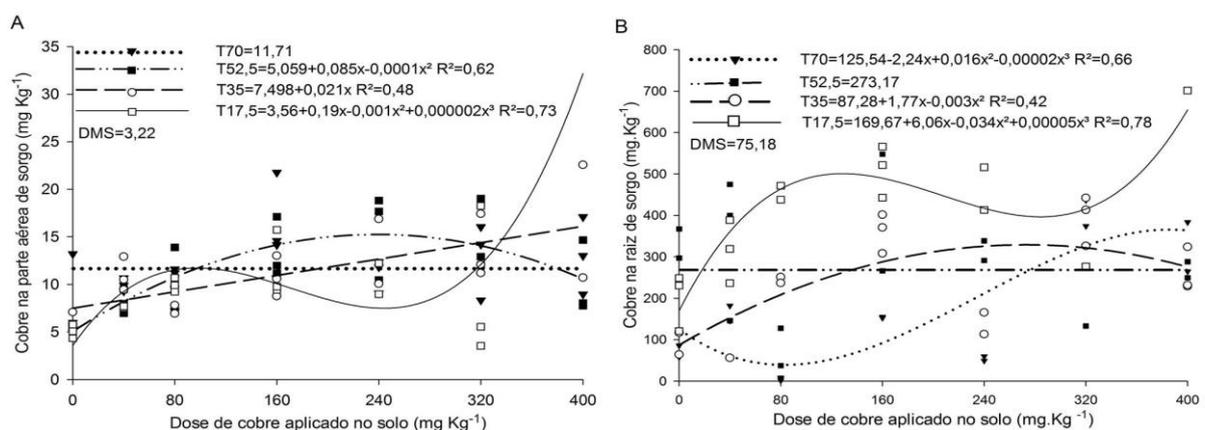


A massa seca de raiz do sorgo diminuiu linearmente com a aumento da dose de cobre no solo em todas as texturas estudadas (Figura 3B), A toxidez de  $\text{Cu}^{+2}$  no sistema radicular se expressa, sobretudo, na ausência de formação de raízes e, conseqüentemente, diminuição da massa das mesmas, o que acarreta em um gradiente de redução da capacidade de absorção de água e nutrientes essenciais ao crescimento da planta (TAIZ et al., 2017).

### 3.3.3 Influência da textura do solo e doses de cobre sobre o teor de cobre em plantas de Soja e Sorgo

Os resultados do teor de cobre ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) da parte aérea de sorgo demonstraram interação significativa entre os fatores de variação (Figura 4 A e B), sendo que, para o sorgo as maiores concentrações de cobre na parte aérea foram encontradas nas doses maiores sobretudo a de  $400 \text{ mg kg}^{-1}$  e nas texturas mais arenosas. O sorgo cultivado no solo com textura de 52,5 % de argila apresentou resposta quadrática, tendo como ponto de máxima  $214 \text{ mg de cobre kg}^{-1}$  solo esses valores se aproximam com o encontrado na literatura (TAVARES; OLIVEIRA; SALGADO, 2013), onde foi demonstrado o potencial do sorgo em fitoextrair cobre do solo, utilizando um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura mediana. Desse modo, mesmo a capacidade fitoextratora de sorgo sendo potencializada em solos com textura mais arenosa e com doses maiores de cobre no solo, os resultados obtidos estão dentro dos valores de referência de nutrientes adequados para essa cultura (MARTINEZ; CARVALHO; SOUZA, 1999).

Figura 4 - Equações de regressão teor de cobre ( $\text{mg,kg}^{-1}$ ) da parte aérea e raiz de sorgo cultivado em solos com diferentes texturas (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e  $400 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

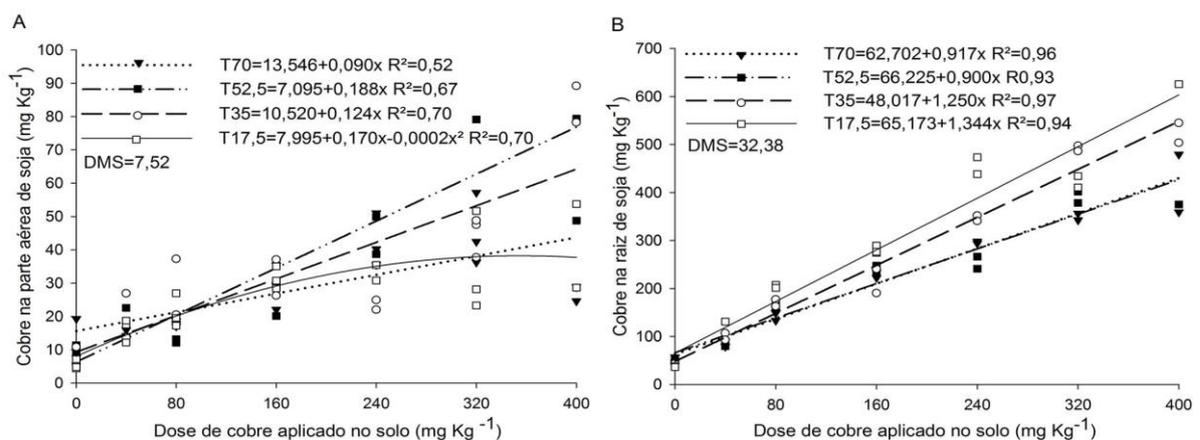


O teor de cobre na raiz do sorgo respondeu de forma diferente nas texturas estudadas, no solo com 35 % de argila atingiu ponto de máxima de  $295 \text{ mg de cobre kg}^{-1}$  solo, o solo com 17,5 e 70 % de argila geraram uma curva cubica de resposta no acúmulo de cobre na raiz

(Figura 4 B). Esta diferença pode ser explicada pela figura 2, considerando as variações entre as doses de cobre aplicadas no solo e o teor pseudo-total de cobre no solo. Considerando estas variações, o cobre acumulado na raiz de sorgo aumenta em solos com texturas mais extremas (70 e 17,5 % de argila) com o acréscimo de cobre no solo, esta forma responsiva tende a linearidade ao passo que doses acima de 400 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo. Técnicas biológicas de fitoextração de cobre são consideradas potencialmente eficientes (MALLMANN et al., 2016), no entanto, os resultados encontrados na figura 4 evidenciaram que as plantas exibem comportamento diferente em relação à absorção e translocação dos metais das raízes para a parte aérea e, por isso, possuem teores diferenciados nas diferentes partes (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000).

Houve interação significativa entre doses de cobre e texturas de solo para o teor de cobre ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) da parte aérea e raiz de soja (Figura 5 A e B), sendo que o teor de cobre na parte aérea aumentou linearmente até 76  $\text{mg kg}^{-1}$  e de forma quadrática para 425  $\text{mg kg}^{-1}$  solo menos arenoso (17,5 % de argila), as maiores concentrações de cobre na parte aérea foram encontradas nos solos com maiores teores de argila, considerando que a mobilidade dos metais é, geralmente, maior em solos arenosos (MEDINA et al., 2018), este fato corrobora com o demonstrado na figura 1.

Figura 5 - Equações de regressão teor de cobre ( $\text{mg,kg}^{-1}$ ) da parte aérea e raiz de soja cultivada em solos com diferentes texturas (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400  $\text{mg kg}^{-1}$ ).

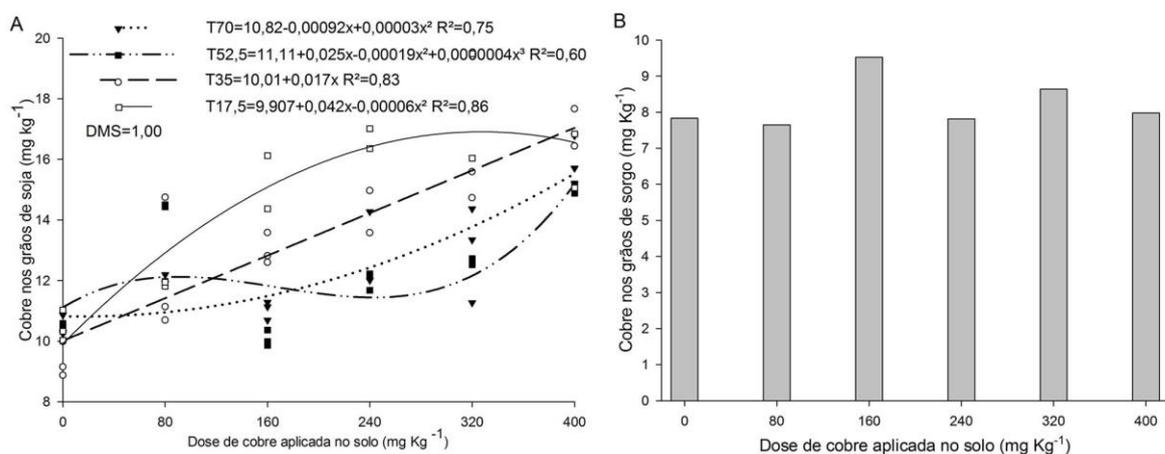


O teor de cobre na raiz da soja aumentou linearmente conforme as doses de cobre no solo para os quatro tipos de textura, sendo que o solo com menor teor de argila acumulou

maior teor de cobre até a dose de 400 mg kg<sup>-1</sup> de solo (Figura 5B). Plantas que apresentam tolerância quanto a absorção dos metais pesados, geralmente acumulam maiores concentrações destes metais na raiz em relação à parte aérea, indicando que as plantas que crescem nessas condições não conseguem evitar a absorção dos metais, mas limitam sua translocação afetando o crescimento, a distribuição e o ciclo biológico das espécies vegetais (GARBSU; ALKORTA, 2001).

O teor de cobre no grão da soja apresentou interação significativa entre os fatores de variação (Figura 6), a textura mais arenosa 17,5 % e a mais argilosa 70% possibilitaram resposta quadrática quanto ao acúmulo de cobre nos grãos de soja, com ponto de máxima de 350 ponto de mínima de 15 mg de cobre kg<sup>-1</sup> solo, respectivamente, Solos com textura intermediária tendem a apresentar resposta linear, pois aumentaram o teor de cobre no grão com o acréscimo nas doses de cobre aplicada no solo. A literatura relata teores 7,6 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de grãos de soja cultivado em solos sem aplicações de cobre (MAGALHÃES et al., 2016). Desse modo, houve um aumento expressivo deste metal no grão quando a soja foi cultivada com doses altas de cobre no solo, atingindo valores acima dos limites máximos de tolerância dos contaminantes inorgânicos, de 10 mg de cobre kg<sup>-1</sup> previstos pela ANVISA (1998). Valores acima do limite estabelecido pela ANVISA, como os encontrados no presente estudo, são fontes para potenciais estudos quanto aos possíveis benefícios ou problemas associados ao consumo dos subprodutos gerados a partir de grãos oriundos de áreas com solos contaminados por cobre.

Figura 6 - Equações de regressão para o teor de cobre (mg kg<sup>-1</sup>) nos grãos de soja (A) e grãos de sorgo (B) cultivados em quatro solos de diferentes texturas (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup>).



Para o teor de cobre nos grãos de sorgo (Figura 6 B) não houve diferença entre os fatores estudados, entretanto, aos valores encontrados indicam que não há expressiva translocação de cobre para os grãos na cultura do sorgo, o que possibilita a utilização desta cultura em áreas contaminadas por cobre, assim, possibilitando a produção de biomassa vegetal e grãos nestas áreas, tendo em vista a versatilidade da cultura.

### 3.4 CONCLUSÕES

A textura de solo é causadora de efeito de variações nas respostas dadas pela soja e sorgo em áreas contaminadas com cobre.

A parte aérea e o sistema radicular de soja e sorgo são afetados de forma negativa pela adição de cobre no solo.

O acréscimo de cobre no solo tem interação positiva com o aumento deste metal no grão da soja, assim áreas contaminadas com cobre podem ser consideradas impróprias para o cultivo desta espécie.

### 3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 299–352.

ADREES, M. et al. The effect of excess copper on growth and physiology of important food crops: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 11, p. 8148–8162, 2015.

AQUINO, A. J. S. de et al. Crescimento, partição de matéria seca e retenção de Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> em dois genótipos de sorgo irrigados com águas salinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 961–971, 2007.

ARAÚJO, A. S. F. de; MONTEIRO, R. T. R.; CARDOSO, P. F. Composto de lodo têxtil em plântulas de soja e trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 6, p. 549–554, 2005.

BAKER, D. E. Copper. In: ALLOWAY, B. J. (Org.). **Heavy Met. Soils**. New York: John

Wiley, 1990. p. 151–196.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach**. New York: John Wiley, 1984. Disponível em:

<[https://www.univates.br/unianalises/media/imagens/Anexo\\_XI\\_61948\\_11.pdf](https://www.univates.br/unianalises/media/imagens/Anexo_XI_61948_11.pdf)>.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. de. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.

BOCHICCHIO, R. et al. Root architecture and morphometric analysis of *Arabidopsis thaliana* grown in Cd/Cu/Zn-gradient agar dishes: A new screening technique for studying plant response to metals. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 91, p. 20–27, 2015.

BOUMA, T.; NIELSEN, K.; KOUTSTAAL, B. Sample preparation and scanning protocol for computerised analysis of root length and diameter. **Plant and soil**, v. 218, p. 185–196, 2000.

BURKHEAD, J. L. et al. Tansley review. Copper homeostasis. **New Phytologist**, v. 182, n. 4, p. 799–816, 2009.

CECCON, G. et al. Produtividade de cultivares de sorgo sacarino em diferentes épocas de semeadura e tipos de solo. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 5, n. 2, p. 69–75, 2018.

CENTENO, L. et al. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31–37, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/RBES/article/view/11576/7912>>.

CONAB. **Série Histórica de Produção**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>>. Acesso em: 20 fev. 2019.

CONAMA. **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Disponível em: <<http://sapotecsul.com.br/sapotec/DOWNLOADS/CONAMA420.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2019.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S. (Org.). **Nutr. Miner. plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 328–352.

DICKO, M. H. et al. Sorghum grain as human food in Africa : relevance of content of starch and amylase activities. **African Journal of Biotechnology**, v. 5, n. 5, p. 384–395, 2006.

FALKER, A. agrícola. **Manual do medidor eletrônico de teor clorofila (ClorofiLOG/CFL 1030)**. . Porto Alegre: [s.n.], 2008

FEPAM. **Portaria FEPAM N.º 85/2014 Dispõe**. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/legislacao/arq/Portaria085-2014.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2019.

GARBISU, C.; ALKORTA, I. Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the

removal of metals from the environment. **Bioresource Technology** **77**, v. 77, p. 229–236, 2001.

GARCIA-MOLINA, A. et al. The intracellular arabidopsis COPT5 transport protein is required for photosynthetic electron transport under severe copper deficiency. **Plant Journal**, v. 65, n. 6, p. 848–860, 2011.

GARCIA, L.; WELCHEN, E.; GONZALEZ, D. H. Mitochondria and copper homeostasis in plants. **Mitochondrion**, v. 19, n. PB, p. 269–274, 2014.

GATIBONI, L. C. et al. **Proposta de limites críticos ambientais de fósforo para solos de santa catarina**. Lages- SC: [s.n.], 2014.

GAUTAM, S.; ANJANI, K.; SRIVASTAVA, N. In vitro evaluation of excess copper affecting seedlings and their biochemical characteristics in *Carthamus tinctorius* L. (variety PBNS-12). **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 22, n. 1, p. 121–129, 2016.

JORGE, L. A. de C.; RODRIGUES, A. F. de O. **Safira: Sistema de Análise de Fibras e Raízes**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008.

KUKKOLA, E.; RAUTIO, P.; HUTTUNEN, S. Stress indications in copper- and nickel-exposed Scots pine seedlings. **Environmental and Experimental Botany**, v. 43, n. 3, p. 197–210, 2000.

MAGALHÃES, W. de A. et al. Revista de Ciências Agroambientais. **Revista de Ciências Agroambientais**, v. 13, n. 2, p. 110–118, 2016.

MALLMANN, F. J. K. et al. Manejos indicados pela pesquisa para mitigar o excesso de metais pesados nos solos do sul do Brasil. In: TIECHER, T. (Org.). **Manejo e Conserv. do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Bras. práticas Altern. manejo visando a Conserv. do solo e da água**. Porto Alegre: UFRGS, 2016. p. 187.

MANN, S. S.; RITCHIE, G. S. P. Changes in the Forms of Cadmium with Time in Some Western Australian Soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 32, n. 2, p. 241–250, 1993.

MARQUES, D. M. et al. Copper Toxicity on Photosynthetic Responses and Root Morphology of *Hymenaea courbaril* L. (Caesalpinioideae). **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 229, n. 5, p. 3–14, 2018.

MARQUES, T. C. L. L. D. S. E. M.; SIQUEIRA, F. M. D. S. M.; OSWALDO, J. Crescimento e teor de metais de mudas de espécies arbóreas cultivadas em solo contaminado com metais pesados. **Pesq. agropec. bras**, v. 38, n. 1, p. 121–132, 2000.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. London: Elsevier, 2012a.

\_\_\_\_\_. Preface to Second Edition. **Marschner's Miner. Nutr. High. Plants.** [S.l: s.n.], 2012b. .

MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G. de; SOUZA, R. B. de. Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. (Org.). . **Recom. para uso corretivos e Fertil. em Minas Gerais 5ª Aproximação.** Viçosa: Comissão de fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 143–168.

MEDINA, E. F. et al. Seleção de solos da região de viçosa para utilização como barreira química para metais pesados. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 04, n. 3, p. 1–6, 2018.

MIYAZAWA, M. et al. Análise química de tecido vegetal. In: SILVA, F. C. (Org.). . **Man. análises químicas solos, plantas e Fertil.** 2. ed. Brasília: Embrapa informação tecnológica, 2009. p. 193–233.

MOCQUOT, B. et al. Copper toxicity in young maize ( *Zea mays* L .) plants : effects on growth , mineral and chlorophyll contents , and enzyme activities Author ( s ): B . Mocquot , J . Vangronsveld , H . Clijsters and M . Mench Published by : Springer Stable URL : <http://www. Plant and Soil>, v. 182, n. 2, p. 287–300, 1996.

MUTISYA, J. et al. Diurnal oscillation of SBE expression in sorghum endosperm. **Journal of Plant Physiology**, v. 166, n. 4, p. 428–434, 2009.

ÖNCEL, I.; KELES, Y.; ÜSTÜN, A. S. Interactive effects of temperature and heavy metal stress on the growth and some biochemical compounds in wheat seedlings. **Environmental Pollution**, v. 107, p. 315–320, 2000.

PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S. **Sorgo : o produtor pergunta, a Embrapa responde.** Brasília: Embrapa, 2015.

PEZZAROSSA, B. et al. Communications in Soil Science and Plant Analysis Phosphatic fertilizers as a source of heavy metals in protected cultivation. **Communications in Soil Science and Plant Analysis ISSN:**, v. 21, n. 10, p. 737–751, 1990.

POZZEBON, N. J. et al. Caracterização do manejo da fertilidade do solo em sistemas de cultivo de soja no município de Dom Pedrito – RS. **Revista Científica Rural**, v. 20, n. 1, p. 50–61, 2018.

RESENDE, Á. V. de et al. **Protocolo de Avaliação Agronômica de Rochas e Produtos Derivados como Fontes de Nutrientes às Plantas ou Condicionadores de Solo.** . Sete Lagoas, MG: [s.n.] . , 2012

ROSOLEM, C. A. et al. Morfologia radicular e suprimento de potássio às raízes de milho de acordo com a disponibilidade de água e potássio. **Rista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 1, p. 875–884, 2003.

- SANTOS, H. G. dos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013.
- SANTOS, H. P. dos et al. **Comportamento fisiológico de plantas de aveia (*Avena strigosa*) em solos com excesso de cobre**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2004.
- SANTOS, H. C. et al. Cu e Zn na cultura do sorgo cultivado em três classes de solos . I . Crescimento vegetativo e produção. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 125–130, 2009.
- SAS, L. E. **Getting started with the SAS Learning Edition**. . Cary: [s.n.] , 2000
- SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. **Soja do plantio à colheita**. Viçosa: UFV, 2015.
- SILVEIRA, M. L. A. et al. Copper adsorption in oxidic soils after removal of organic matter and iron oxides. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, n. 19–20, p. 3581–3592, 2002.
- SOARES, C. R. F. S. et al. Fitotoxidez de cádmio para *Eucalyptus maculata* E *E. urophylla* em solução nutritiva. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 175–183, 2005.
- SOUZA, E. P. De; FRANÇA, I. De; FERREIRA, L. E. Mecanismos de tolerância a estresses por metais pesados em plantas. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 17, p. 167–173, 2011.
- TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: [s.n.], 2017.
- TAVARES, S. R. L.; OLIVEIRA, S. A.; SALGADO, C. M. Avaliação de espécies vegetais na fitorremediação de solos contaminados por metais pesados. **Holos**, v. 5, p. 80–97, 2013.
- TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995.
- TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v. 63, n. 3, p. 995–1001, 1975.
- VON PINHO, R. .; VASCONCELOS, R. C. de. **Cultura do sorgo**. Lavras: UFLA, 2002.
- WALL, J. S.; ROSS, W. M. **Produccion Y usos del sorgo**. Buenos Aires: Editorial Hemisfério Sul, 1975.
- YRUELA, I. Copper in plants: Acquisition, transport and interactions. **Functional Plant Biology**, v. 36, n. 5, p. 409–430, 2009.
- ZORTÉA, T. et al. Toxicidade do cobre em função da correção do pH em dois solos naturais – Uma abordagem com. **REVISTA SCIENTIA AGRARIA**, v. 17, n. 1, p. 1–9, 2016.

## **4 CAPÍTULO 2 – INFLUÊNCIA DA TEXTURA NA CAPACIDADE FITOEXTRATORA DE PLANTAS AGRÍCOLAS E NOS TEORES DE COBRE EM SOLOS CONTAMINADOS**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

Os metais pesados são elementos que ocorrem naturalmente no solo, e no caso do cobre (Cu), podem ser considerados micronutrientes essenciais para os vegetais. Entretanto, quando presente em elevadas concentrações, esse elemento químico pode causar danos ao ambiente e à cadeia alimentar. As fontes antropogênicas de metais pesados são provenientes das atividades industriais, agrícolas e urbanas (BAKER, 2000), sendo o solo um dos principais receptores de tais metais.

Devido à intensa e contínua utilização de metais pesados pelas atividades antrópicas, têm-se aumentado a contaminação ambiental, tornando-se um problema pertinente e motivo de intensa pesquisa (ANDREAZZA et al., 2013), assim, práticas agrícolas inadequadas também podem levar a acumulação de Cu no solo (MCLAUGHLIN et al., 2000), decorrentes da utilização de corretivos, fertilizantes, defensivos e fungicidas a base de Cu na camada arável (TURRA; FERNANDES; BACCHI, 2011), além disso, aplicações repetidas de dejetos de animais podem levar a acumulação de Cu (RHODEN et al., 2017), uma vez que este elemento está incluído na dieta de suínos e aves, como promotor de crescimento (RUYTERS et al., 2013). A concentração de metais nos materiais descartados nem sempre é monitorada, de forma que a utilização, por exemplo, de esterco suíno é feita por agricultores de pequenas propriedades como adubo orgânico, podendo comprometer a qualidade do solo com o aumento do teor de metais como cobre e zinco (LOPES et al., 2014b).

A disponibilidade do cobre no solo está relacionada à força de interação com os diferentes componentes que o integram. A sorção máxima envolvendo o cobre relaciona-se ao acúmulo do elemento na interface solo-solução, e se diferencia entre os constituintes, diminuindo conforme a seguinte ordem: óxidos de Mn > matéria orgânica > óxidos de Fe > argilominerais (BRADL, 2004). No solo o elemento pode se encontrar complexado com a fração orgânica e a inorgânica, diversos compostos solúveis e insolúveis são capazes de reagir com o cobre, e sua concentração na fase líquida é determinada pela solubilidade da forma menos solúvel presente no sistema (SILVEIRA et al., 1999). Assim como outros metais

pesados, o cobre tem sua solubilidade controlada por um conjunto de reações químicas que ocorrem na superfície dos colóides do solo, que compreendem fenômenos de adsorção/dessorção, precipitação e complexação (CAMPOS, 2010). Os óxidos de alumínio, ferro e manganês e os grupos funcionais ácidos da matéria orgânica compreendem as superfícies reativas mais representativas, por apresentarem as maiores superfícies específicas e, portanto, os maiores pontos de contatos com a solução do solo.

A concentração de metais pesados na solução do solo resulta do equilíbrio entre as reações de precipitação, dissolução, complexação e adsorção, que são influenciadas por diversos fatores, como tipo de solo, clima, cultura e forma química dos elementos (MEDINA et al., 2018). Dentre as propriedades do solo que influenciam as reações dos metais e sua mobilidade incluem-se a superfície específica, textura, temperatura, pH, potencial redox, capacidade de troca catiônica (CTC), quantidade de matéria orgânica, quantidade e tipo de minerais de argila e de metais e a competição iônica (OLIVEIRA; MATTIAZZO, 2001; SOUZA et al., 2018).

É necessário considerar que cada tipo de solo, de acordo com suas características, possui uma determinada capacidade de retenção de metais pesados, quando se excede esta capacidade, o metal pode sofrer lixiviação ou ser carregado pela chuva e pode atingir águas superficiais e subterrâneas. Assim, a determinação da capacidade de retenção de metais contaminantes no solo é de fundamental importância quando relacionada à solubilidade e à disponibilidade do poluente no meio (GONÇALVES et al., 2013). No caso de solos muito intemperizados, como os ácricos, com predominância de mineralogia oxidada na fração argila, a reação de adsorção de cobre tem características distintas de solos com mineralogia 2:1.

Os solos arenosos são os mais suscetíveis à ocorrência de contaminação devido à baixa capacidade de reter íons (BASSO; KIANG, 2017), os solos argilosos apresentam baixa condutividade hidráulica saturada (FETTER, 2001). Neste contexto, alguns solos argilosos tipicamente lateríticos também podem ser altamente permeáveis, isto é, quando bem estruturados fisicamente, com isso apresentando características como a alta quantidade de agregados com estrutura porosa que são constituídos predominantemente de argilominerais, cimento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e alto teor de umidade, assim a estrutura desses solos é responsável por sua elevada permeabilidade natural quando percolados por água (BASSO; KIANG, 2017).

Considerando que as variáveis o conteúdo de argila está entre as variáveis que apresentam grande correlação com os teores de metais pesados para os solos estudados (FADIGAS et al., 2002). Assim, podemos considerar que o acúmulo de metais pesados em solos agrícolas é um aspecto de grande preocupação quanto à segurança ambiental

(SILVEIRA et al., 1999), desta forma evidencia-se a importância de estudos no sentido de gerar dados para o melhor entendimento destas relações. A preocupação crescente com a poluição do meio ambiente, mais especificamente a poluição dos solos, remete a diversos estudos relacionados a essa abordagem, neste contexto pesquisas nesta área são necessárias a fim de elucidar e solucionar esse problema criado pela sociedade moderna, a fim de garantir a manutenção de um ambiente saudável (FERREIRA, 2014).

A cultura da soja (*Glycine max* L.) tem grande relevância na balança comercial brasileira e no suprimento do mercado interno sendo considerada principal commodity agrícola brasileira colocando o país em segundo lugar no ranking mundial, com uma produção de 95,434 milhões de toneladas na safra de 2015/2016, sendo superado apenas pelos Estados Unidos com 106,86 milhões toneladas nessa mesma safra (FAO, 2014; CONAB, 2017).

A cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* L, Moench) destaca-se pela sua rusticidade e grande tolerância ao déficit hídrico, características que tem potencializado a expansão de sua área plantada no Brasil, seu cultivo é geralmente confundido com a baixa tecnologia, no entanto, o sorgo responde muito ao suprimento de água e, em especial a adubação podendo superar produtividade de grãos e matéria seca normalmente obtidos pela cultura do milho (RESENDE et al., 2009). Além disso, o sorgo apresenta sistema radicular abundante, o que contribui para a infiltração de água, além de favorecer a agregação e a aeração do solo (SILVA et al., 2017).

Trabalhos mostram que lavouras com alta produtividade de soja apresentam em média 10 mg kg<sup>-1</sup> de cobre no solo (VITTI; TREVISAN, 2000), sendo que no Cerrado já estabeleceu-se os níveis mínimos críticos de cobre para a produção de soja, que ficam entre 0,5 e 0,8 mg Kg<sup>-1</sup> (GALRÃO, 1999). A deficiência de cobre no solo causa redução do crescimento da planta pelo encurtamento dos internódios e as folhas mais novas assumem a cor verde-acinzentada ou verde-azulada, sua toxicidade causa aparecimento de pontos necróticos na borda dos folíolos das folhas mais velhas, que progridem para as mais novas (SFREDO; BORKERT, 2004).

Alguns metais pesados, quando presentes em elevadas concentrações, podem ser considerados tóxicos para as plantas, porém, algumas espécies desenvolveram a capacidade de crescerem em ambientes com excesso desses metais, acumulando os mesmos em seus tecidos sem prejudicar o seu desenvolvimento (DIPU; KUMAR; THANGA, 2012). Essas plantas podem ser utilizadas como fitorremediadoras, sendo que a eficiência irá depender da capacidade das plantas apresentarem em se estabelecerem em solos contaminados, acumulando o

metal na raiz ou translocando para a parte aérea, produzindo elevada biomassa (KOPTSIK, 2014). Além da elevada tolerância ao metal pesado, outras características desejáveis em uma planta fitorremediadora são a rusticidade, a grande produção de biomassa e a viabilidade de sua descendência, tudo isto mesmo quando expostas aos altos teores de metais pesados. Estas características possibilitariam a obtenção de uma planta fitorremediadora ideal, acumulando grande quantidade de metais pesados em seus tecidos aliado a uma alta quantidade de biomassa, no entanto esta condição é muito difícil de ser obtida (MALLMANN et al., 2016).

O teor pseudo-total e disponível de cobre é influenciado pela textura do solo, sendo que, áreas contaminadas com cobre apresentam restrições quanto a aptidão ao cultivo de culturas agrícolas. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo analisar a influência da textura na capacidade fitoextratora de plantas agrícolas e nos teores de cobre em solos contaminados.

#### 4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi instalado e conduzido em ambiente protegido, casa de vegetação pertencente ao departamento de Engenharia Florestal do Campus da UFSM Frederico Westphalen, RS, sendo utilizado um único tipo de solo, com alto teor de argila, no qual foi misturado diferentes quantidades de areia, possibilitando desta forma a elaboração de solos com diferentes porcentagens de argila.

O solo utilizado no experimento foi coletado em horizonte subsuperficial (horizonte A) caracterizado como Latossolo Vermelho aluminoférrico (SANTOS et al., 2013). Após a coleta, o solo foi secado em estufa com aeração forçada a  $65\pm 1^\circ\text{C}$ , moído e peneirado em malha de 2 mm, sendo analisado no laboratório de química do solo cujas características físicas e química são apresentadas na Tabela 1, conforme metodologia descrita por Mann e Ritchie (1993) para o cobre trocável (extrator  $\text{KCl } 0,005 \text{ mol L}^{-1}$ ) e Tedesco et al, (1995) para os demais elementos dos solos utilizados no experimento, a determinação dos teores de cobre pseudo-total no solo foi realizada conforme metodologia 3050b descrita em USEPA (1996).

No sentido de elaborar solos com diferentes teores de argila, seguiu-se a metodologia proposta por Gatiboni et al., (2014). O solo utilizado continha inicialmente 70% de argila, para a elaboração das diferentes texturas foram realizadas misturas de areia e solo, sendo

adicionado areia nas proporções de: 75; 50; 25 e 0. Ao final deste processo os solos elaborados apresentaram teores de 17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila, respectivamente.

Tabela 1 - Textura e análise química dos solos construídos utilizado para cultivo da cultura da soja e sorgo.

----- Atributo -----								
Textura	pH	M O	P	K	Mg	Al+H	Cu	Zn
%	01:01	%	-----mg/dm <sup>3</sup> -----			mg/dm <sup>3</sup>		
70	5,98	0,9	0,72	26,44	2,56	2,09	8,8	0,52
52,5	5,99	0,88	0,8	22,86	1,82	1,91	7,2	0,58
35	6,05	0,8	0,86	20,68	1,37	1,87	6,9	0,62
17,5	5,95	0,76	0,9	16,7	0,57	1,78	6,4	0,7

No sentido de elaborar solos com diferentes teores de argila, seguiu-se a metodologia proposta por Gatiboni et al., (2014). O solo utilizado continha inicialmente 70% de argila, para a elaboração das diferentes texturas foram realizadas misturas de areia e solo, sendo adicionado areia nas proporções de: 75, 50, 25 e 0. Ao final deste processo os solos elaborados apresentaram teores de 17.5, 35, 52.5 e 70 % de argila, respectivamente.

Após o estabelecimento das texturas do solo realizou-se análise química dos mesmos, evidenciando-se a necessidade de calagem para cada solo. Em cada textura de solo foi adicionado calcário para atingir pH em água de 6.5 e após este procedimento os solos foram incubados por 45 dias. Durante a incubação das diferentes texturas, os solos foram acondicionados em vasos e a umidade mantida em 80 % da capacidade de campo, para estabilização de propriedades físico-químicas desses solos artificiais. Após a incubação foi realizado a contaminação dos solos. As doses de cobre foram aplicadas 30 dias antes da semeadura das sementes de soja e sorgo, na forma de solução de sulfato de cobre (CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O), sendo homogeneizados no solo por agitação em saco plástico.

A cultivar de soja utilizada foi BRASMAX RAI0 50I52RSF IPRO e a cultivar de sorgo foi o híbrido TAMBO BMR. Para o cultivo das plantas em casa de vegetação foi utilizado vasos plásticos com capacidade de 5 litros preenchidos com 5kg de solo. Na primeira quinzena de setembro foi feito a semeadura das duas culturas, assim, em cada vaso foi semeado 8 sementes de cada cultura, sendo realizado o desbaste oito dias após a germinação, deixando uma planta por vaso até o final do experimento, sendo o final do ciclo

produtivo das culturas estudadas. A irrigação foi realizada diariamente com água por meio de um sistema de gotejamento, mantendo a umidade a 80% da capacidade de campo.

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso em arranjo fatorial (7 x 4), sendo sete doses de cobre (0 (zero), 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre Kg<sup>-1</sup>) quatro texturas de solo (17.5, 35, 52.5 e 70 % de argila), com cinco repetições. Foram conduzidos dois experimentos concomitantes, um com a cultura do sorgo e outro com a cultura da soja.

Posteriormente as raízes e a parte aérea foram moídas em moinho tipo Wiley com peneira de malha de 10 mesh para a determinação dos teores de cobre (Cu) na parte aérea e nas raízes, através de digestão nítro-perclórica (3:1) e determinação em espectrofotometria de absorção atômica, conforme descrito por MIYAZAWA et al, (2009).

Com base na massa seca total (MST), nos teores de cobre (mg kg<sup>-1</sup>) do sistema radicular (CuR) e da parte aérea (CuPA), nas quantidades acumuladas de cobre (µg planta<sup>-1</sup>) no sistema radicular (CuAR), na parte aérea (CuAPA) e no total das mudas (CuAT), na dose zero de cobre (d0) e nas doses de 80 à 400 mg kg<sup>-1</sup> (dn), foi calculado o índice de tolerância (Itol), conforme a equação:  $Itol = (MSTdn/MSTd0)*100$ , que mede a capacidade das mudas crescerem em ambientes com elevada concentração de cobre (WILKINS, 1978) e o índice de translocação (Itra), com base na equação:  $Itra = (CuAPAdn/CuATdn)*100$ , que corresponde à porcentagem total absorvida de cobre que foi transportado para a parte aérea (ABICHEQUER; BOHNEN, 1998). O fator de bioconcentração foi determinado pela razão entre a concentração de metal nas raízes (mg kg<sup>-1</sup>) e a concentração pseudo-total no solo (mg kg<sup>-1</sup>) e o fator de bioacumulação foi determinado pela razão entre a concentração de metal na parte aérea (mg kg<sup>-1</sup>) e a concentração pseudo-total no solo (mg kg<sup>-1</sup>) (YOON et., al, 2006).

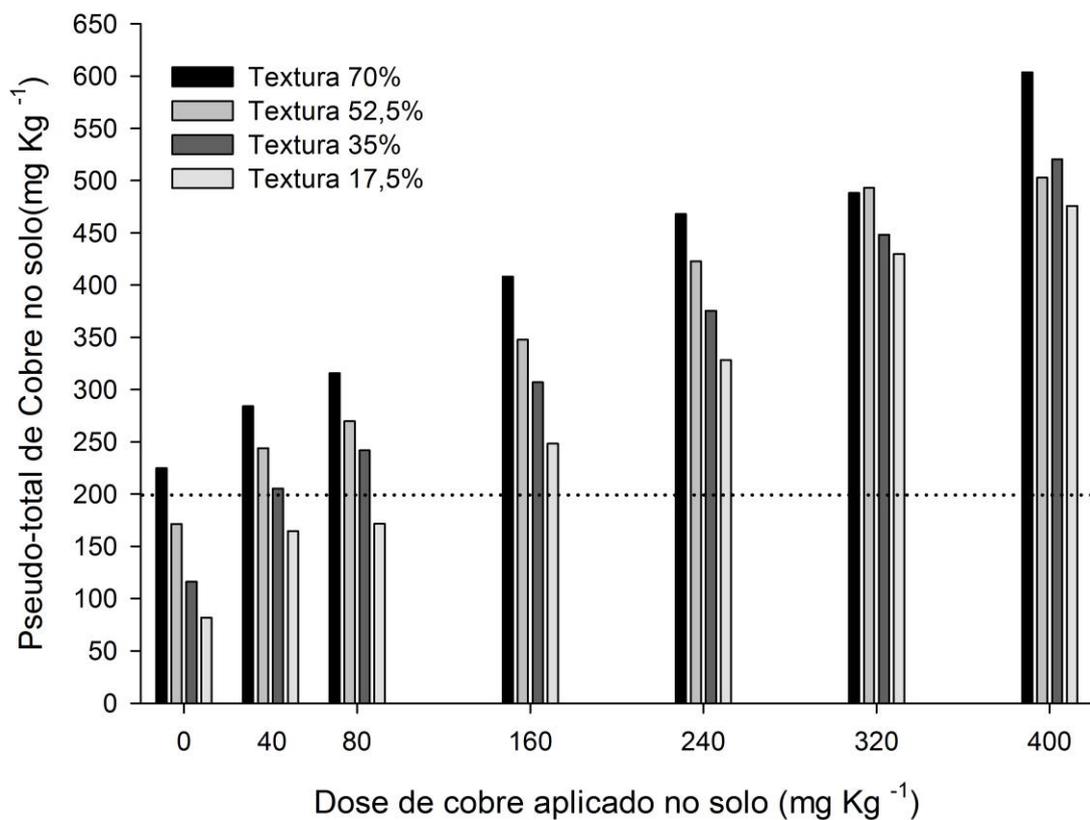
Os resultados foram submetidos a análise de variância através do Software “Statistical Analysis System” (SAS LEARNING EDITION, 2000) e quando houve interação significativa foram desmembrados os efeitos das doses dentro de cada textura testada, por meio de regressão polinomial. Quando não significativo desdobrou-se os efeitos simples, sendo dose por regressão polinomial e textura por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

#### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aumento do teor de argila no solo possibilitou um aumento nos teores de cobre pseudo-totais (Figura 1 e 2), os valores ficaram acima dos limites máximos de investigação

permitidos pela resolução nº 420, que é de 200 mg kg<sup>-1</sup> (CONAMA, 2009) e de 203 mg kg<sup>-1</sup> para solos originados de rochas vulcânicas da região do Planalto do estado do Rio Grande do Sul, Brasil (FEPAM, 2014). Desse modo, os valores de cobre presente nos solos superam o limite de investigação para áreas agrícolas.

Figura 1- Teor pseudo-total de cobre ao final do cultivo de soja e sorgo, em solos de quatro texturas (17,5, 35, 52,5 e 70 % de argila) cultivados com soja e sorgo, submetido a doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo).



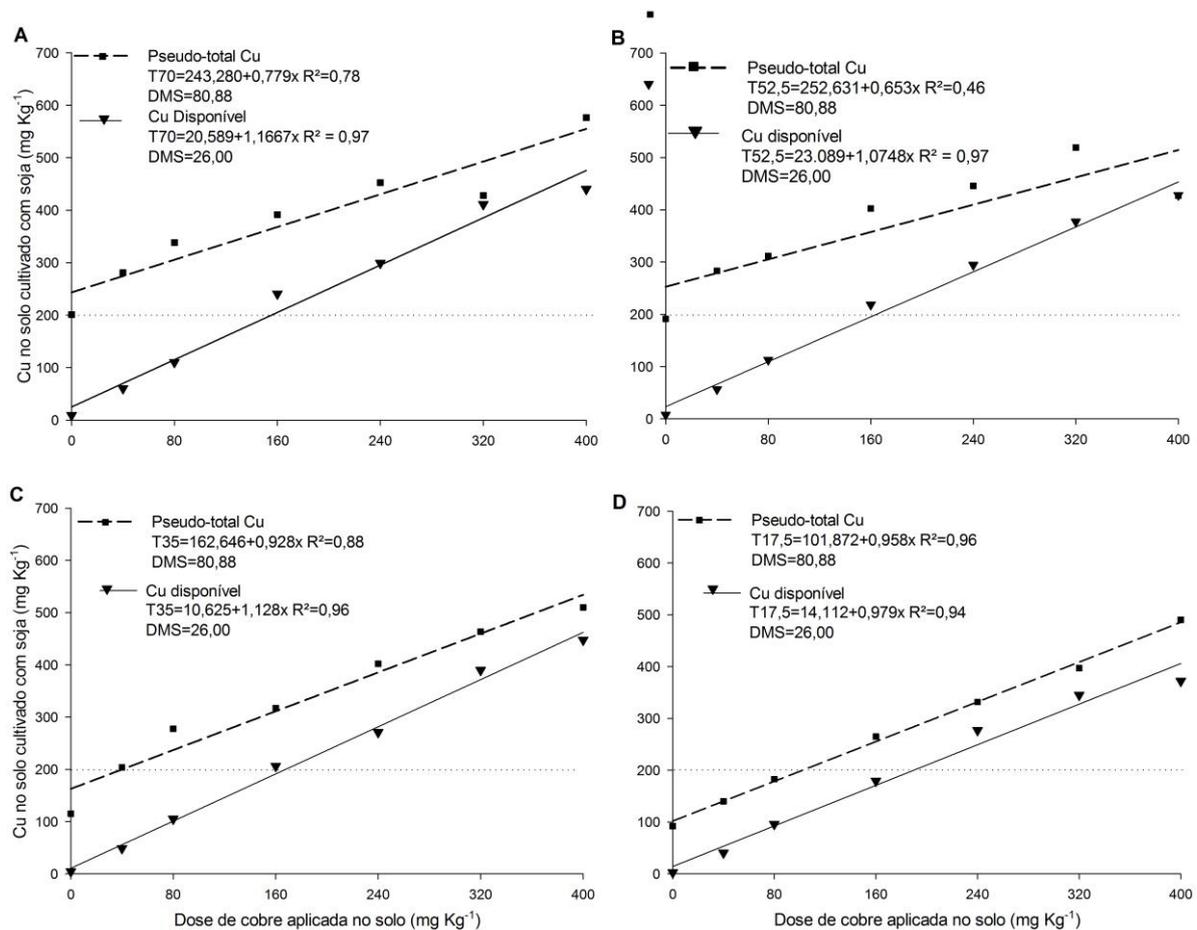
Para cobre disponível e Pseudo-total no solo houve interação significativa entre as doses de cobre aplicadas e as texturas de solo cultivado com soja e sorgo (Figuras 2 e 3 A, B, C e D). No solo com textura de 52,5 70 % de argila o teor Pseudo-total e cobre disponível no solo responderam linearmente ao aumento na dose de cobre no solo (Figura 2 A). No solo com textura de 52,5 % de argila o teor Pseudo-total e disponível cobre no solo respondeu linearmente a aplicação das doses de cobre no solo (Figura 2 B e 2 A). Nestes solos, observa-se que o valor Pseudo-total de cobre na dose zero é de 250 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo, sendo

estes valores acima dos limites máximos de investigação permitidos pela resolução nº 420, que é de 200 mg kg<sup>-1</sup> (CONAMA, 2009). No entanto, os Latossolos são extremamente produtivos, sendo esta classe de solo de suma importância, tendo em vista o seu potencial de produção e a extensão de área que ocupam no planalto sul Riograndense (SECCO et al., 2005). Em várias regiões do Brasil, diversas culturas apresentam sintomas de deficiência de Cu, em Latossolos, essas deficiências podem ser atribuídas à pequena reserva natural desses micronutrientes e às suas baixas disponibilidades, os quais se encontram, predominantemente, nas formas oxídicas e residuais, não-disponíveis às plantas (NASCIMENTO; FONTES, 2004). Assim, deve-se considerar o teor de cobre disponível nestes solos, pois mesmo em valores absolutos menores que o limite máximo de investigação agrícola podem causar efeitos tóxicos nas plantas.

No solo com 35 % e de argila os teores disponíveis e Pseudo-total de cobre no solo responderam de forma linear ao aumento da dose de cobre (Figura 2 C), na dose 0 o teor disponível de cobre é 5,27 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo, aumentando com as doses de cobre no solo, chegando a 200 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo, limite máximo de investigação agrícola com a aplicação de 160 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo. O teor Pseudo-total de cobre no solo na dose zero era de 160 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo, chegando ao limite máximo de investigação agrícola na dose de 40 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo, aumentando linearmente com o acréscimo de cobre. No solo com 17,5 % e de argila os teores disponíveis e Pseudo-total de cobre no solo aumentaram linearmente com o aumento da dose de cobre no solo (Figura 2 D), na dose 0 o teor disponível de cobre no solo é 2,18 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo, aumentando com as doses de cobre no solo. Nas figuras 2 C e 2 D evidencia-se a diferença entre o cobre disponível e o Pseudo-total no solo, assim, considerando que de acordo com a literatura, o teor de argila influencia a mobilidade do cobre no solo (MOREIRA et al., 2008), os solos menos argilosos possuem maior disponibilidade de cobre, mesmo com maiores valores de cobre Pseudo-total menor.

Os teores disponíveis de cobre nos solos com 17,5 (Figura 3 D), 35 (Figura 3 C), 52,5 (Figura 3 B) e 70 (Figura 3 A) % de argila aumentaram linearmente com a adição de cobre no solo. Os valores Pseudo-totais (Figura 3 A, B, C e D) de cobre na dose zero no solo com 70 % de argila está acima do limite máximo de investigação agrícola, nos solos com 52,5, 35 e 17,5 % de argila alcança este valor com a aplicação de 60, 80 e 100 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo respectivamente, evidenciando a interação entre textura de solo e capacidade de adsorção de metais em solos.

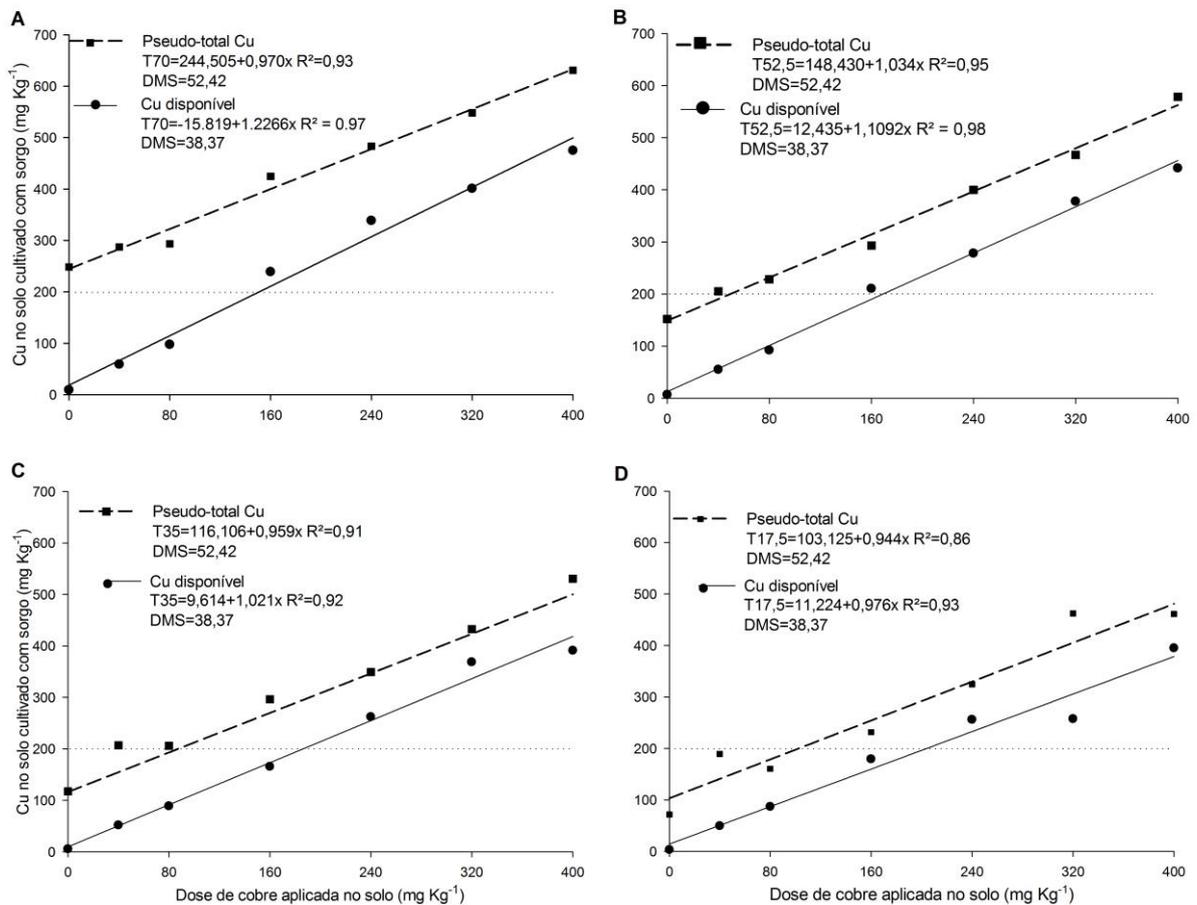
Figura 2 - Cobre disponível e Pseudo -Total em solos sob cultivo de soja, quatro texturas de solo (T17,5, T35, T52,5 e T70 % de argila) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo).



Considerando que a aplicação de cobre nos quatro solos estudados (Figura 2 e 3 A, B, C e D) foram iguais em ambos, a diferença comportamental quanto a teores de cobre disponíveis e Pseudo-totais no solo ao final do ciclo da cultura da soja e sorgo sofreram influência da diferença textural existente, assim, independentemente da espécie vegetal cultivada. Assim, a textura de um solo deve ser considerada como fator preliminar a escolha de uma área para cultivo agrícola, com potencial de acúmulo de cobre no solo, como a utilização de dejetos líquido de suínos como fonte de nutrientes, visando a adubação de culturas (RHODEN et al., 2017) ou aplicações de fungicidas cúpricos na camada superficial do solo para controle de doenças fúngicas em videiras (PANZIERA et al., 2018). Solos mais argilosos (70 e 52,5 % de argila) são capazes de adsorver uma quantidade maior de cobre (Figura 2 A e B), estes resultados corroboram com os encontrados na literatura (BRADY; WEIL, 2013), assim, disponibilizando menores valores para as plantas em comparação a solos menos argilosos (35

e 17,5 % de argila) com o mesmo teor Pseudo-total (Figura 2 C e D), pois estes apresentam menor afinidade com cobre (MOREIRA; ALLEONI, 2010), desta forma evidenciando a maior capacidade de adsorção de cobre em solos com mais argilosos.

Figura 3- Cobre disponível e Pseudo -Total em solos sob cultivo de sorgo, quatro texturas de solo ( T17,5, T35, T52,5 e T70 % de argila) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo).

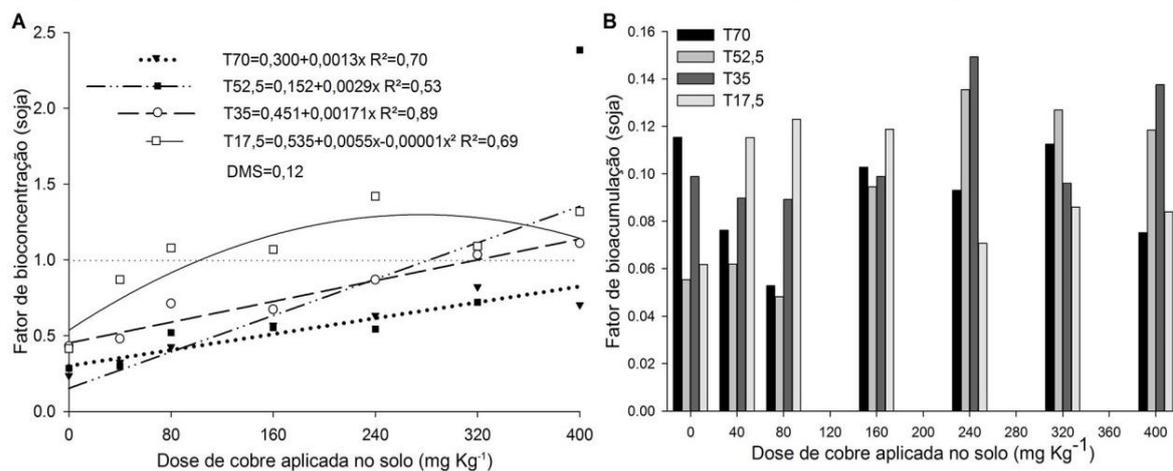


O solo com textura mais argilosa (70 % de argila) suporta uma maior carga de contaminação de cobre (Figura 2 A e 3 A). A mobilidade do cobre está inversamente relacionada à adsorção (retenção) do mesmo no solo, sendo geralmente maior em solos arenosos e com baixo teor de argila (MEDINA et al., 2018), assim solos com 70 % de argila (Figura 2 A) apresenta maior capacidade de adsorção de cobre, pois a capacidade de remoção de um soluto pelo solo está relacionada com a área superficial disponível, que tende a ser maior em minerais de argila (OLIVEIRA, 2015). Quando a quantidade de cobre excede a

máxima capacidade de retenção do solo, este torna-se passível de lixiviação, com consequente aporte em águas subterrâneas (STIGLIANI, 1988) e maior disponibilidade de cobre para as plantas. Considerando que o cobre é encontrado em carnes, frutos-do-mar, em muitos vegetais, cereais e nozes, e apesar da grande importância no corpo humano, seu excesso no organismo é nocivo, pela interferência nas atividades catalíticas normais de algumas enzimas (AZEVEDO et al., 2003).

Para o fator de bioconcentração houve interação significativa entre as doses de cobre aplicadas e as texturas de solo cultivado com soja. Nos solos com 52,5 e 35 % de argila o fator de bioconcentração na cultura da soja foi superior ou próximo a uma unidade a partir da dose de 280 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo (Figura 4 A), respondendo linearmente ao acréscimo de cobre no solo. No solo com 70 % de argila o fator de bioconcentração não alcançou uma unidade até a dose de 400 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo, no solo com 17,5% de argila este valor foi alcançado na dose de 100 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo, com ponto de máxima na dose de 300 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo, plantas que apresentam o fator de bioconcentração maior que uma unidade pode ser recomendada para fitoextração de contaminantes do solo (MCGRATH; ZHAO, 2003).

Figura 4 - Fator de bioconcentração (A) e de bioacumulação (B) de cobre na cultura da soja cultivado em quatro solos com diferentes porcentagens de argila (T17,5, T35, T52,5 e T70 % de argila) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo).

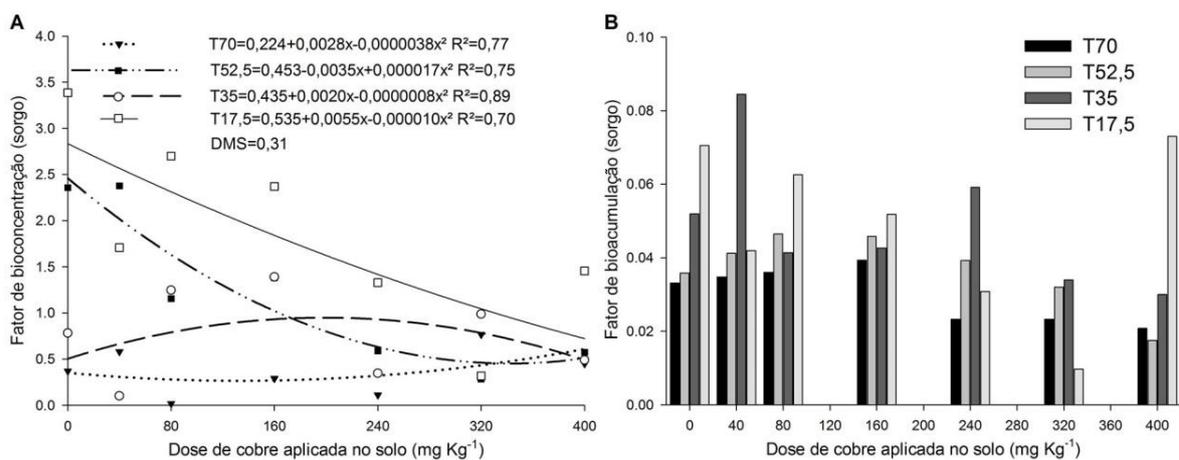


Assim a cultura da soja apresenta capacidade de bioconcentrar cobre (Figura 3 A), sendo este potencial limitado em solos com textura mais arenosa (14,5 % de argila), os solos com texturas intermediárias (35 e 52,5 % de argila) possibilitam um maior fator de

bioconcentração em doses acima de 280 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo, enquanto o solo mais arenoso (17,5 % de argila) potencializa a bioconcentração de cobre na cultura da soja em doses a partir de 100 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo.

Não houve interação significativa para os fatores de variação textura e dose para o fator de bioacumulação (FB) das culturas da soja (Figura 4 B) e do sorgo (Figura 5 B), mantendo seus valores abaixo de uma unidade em todos os tratamentos, Considerando que o FB varia de 0,1 a 1 para o cobre (BRANDSTETTER et al., 2000; FUKSOVÁ; SZÁKOVÁ; TLUSTOŠ, 2009), os resultados encontrados indicam baixa capacidade de translocação de cobre para a parte aérea das culturas.

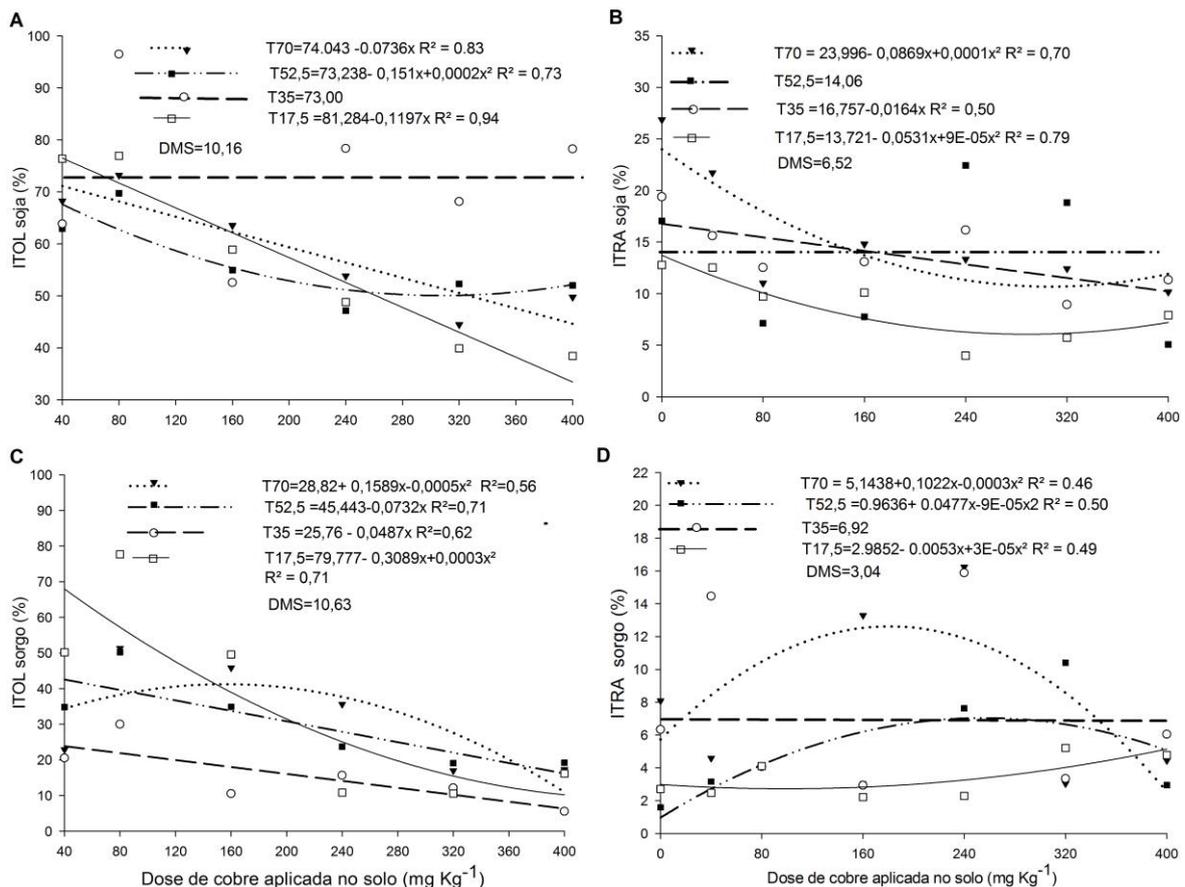
Figura 5 - Fator de bioconcentração (A) e de bioacumulação (B) de cobre na cultura do sorgo cultivado em solos com diferentes porcentagens de argila (T17,5, T35, T52,5 e T70 % de argila) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo).



Houve interação significativa entre as doses de cobre aplicadas e as texturas de solo para o índice de tolerância (ITOL) nas culturas da soja e sorgo (Figura 6 A e 6 C). O ITOL na cultura da soja na textura de 52,5 % de argila respondeu de forma quadrática negativa com ponto de mínima na dose de 273 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo. Na cultura do sorgo (Figura 6 C) os solos com 70 e 17,5 % de argila apresentaram tendência quadrática, com ponto de máxima em 200 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo e ponto de mínima em 515 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo respectivamente para o ITOL, assim, o ITOL nas texturas de 70 e 17,5 % de argila para a cultura da soja (Figura 6 A) e 52,5 e 35 % de argila na cultura do sorgo (Figura 6 C) respondeu de forma linear negativa, com o aumento na dose de cobre, fator importante

quando se busca plantas para fins de fitoestabilização do metal. No entanto, considerando que quando este índice é maior que 60% tem-se alta tolerância das plantas aos contaminantes (LUX et al., 2004). Desse modo, nas texturas 17,5, 52,5 e 70 % de argila, acima da dose de 180 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo ocorre diminuição na tolerância ao cobre na cultura da soja e para o sorgo cultivado em solo com texturas de 17,5, 35 e 52,5 % de argila o ITOL ao cobre é baixo a partir da dose 40 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo, assim, quando o sorgo é cultivado em solo com textura e 70 % de argila apresenta ITOL superior as demais texturas até a dose de 80 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo.

Figura 6 - Índice de Tolerância (ITOL) (A) e índice de translocação (ITRA) (B) de cobre na cultura da soja, ITOL (C) e ITRA (D) de cobre na cultura do sorgo cultivados em solos com diferentes porcentagens de argila ( T17,5, T35, T52,5 e T70 % de argila) e doses de cobre (0, 40, 80, 160, 240, 320 e 400 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo).



No índice de translocação (ITRA) das culturas da soja e sorgo houve interação significativa entre as doses de cobre aplicadas e as texturas de solo (Figura 6 A, B, C e D). Na

soja houve redução linear no ITRA na textura de 35 % de argila enquanto nas de 70 e 17,5 % os ajuste foram de ordem quadrática negativa apresentando ponto de mínima em 300 e 240 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo, respectivamente (Figura 6 C), quanto mais baixo ou próximo a zero o índice de translocação, maior a probabilidade de sobrevivência e crescimento da espécie em ambiente contaminado (BRANZINI; GONZÁLEZ; ZUBILLAGA, 2012; SCHEID et al., 2018), o ITRA encontrado foi abaixo de 25 % para todos os tratamentos, entende-se que a soja pode possuir um mecanismo fisiológico que impeça a translocação de Cu para a parte aérea.

Na cultura do sorgo o ITRA apresentou resposta quadrática nas texturas de 70, 52,5 e 17,5 % de argila, com pontos de máxima nas doses de 180 e 260 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo e ponto de mínima na dose de 160 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo, respectivamente (Figura 6 D). Os resultados obtidos para o sorgo ITRA são considerados baixos para uma planta ser considerada hiperacumuladora (MAHMUD et al., 2008; MELO et al., 2009), Mesmo o Cu não sendo prontamente móvel na planta devido permanecer ligado fortemente às paredes celulares das raízes (KABATA-PENDIAS, 2001) a sua mobilidade nos tecidos vegetais pode aumentar com o nível de suprimento do elemento (CHAVES et al., 2010), fato que não ocorreu neste trabalho, assim o sorgo teve baixo índice de translocação de cobre nas quatro texturas estudadas, apresentando potencialidade de ser cultivado em áreas contaminadas com cobre sem que haja translocação do metal para sua parte aérea, o que garante segurança sobretudo para a alimentação animal.

#### 4.4 CONCLUSÕES

Solo com 17,5 % de argila potencializa a bioconcentração de cobre na cultura da soja em doses a partir de 100 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo.

A soja e o sorgo apresentam baixo índice de translocação de cobre.

Em concentrações acima de 180 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo ocorre uma diminuição na tolerância ao cobre nas culturas da soja e do sorgo cultivados em solos com texturas de 52,5, 35 e 17,5 % de argila.

Deve-se considerar o teor de cobre disponível no solo, pois mesmo em valores absolutos menores que o limite máximo de investigação agrícola podem causar efeitos tóxicos nas plantas.

Quanto mais argiloso um solo, maior é amplitude entre cobre disponível e Pseudo-Total.

#### 4.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICHEQUER. A. D.; BOHNEN. H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 22, n. 3, p. 21–26. 1998.

ANDREAZZA. R. et al. Biorremediação de áreas contaminadas com cobre. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 36, n. 2, p. 127–136. 2013.

AZEVEDO. S. M. DE et al. Levantamento da contaminação por cobre nas aguardentes de cana-de-açúcar produzidas em Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, n. 3, p. 618–624, 2003.

BAKER. A. J. M. Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal polluted soils. In: TERRY. N.; BAÑUELOS. G. (Org.). **Phytoremediation Contam. soil water**. Boca Raton: Lewis Publishers. 2000. p. 85–107.

BASSO. J. B.; KIANG. C. H. Coeficiente de distribuição (kd) de cobre, potássio e cloreto em solos residuais do subgrupo itararé no estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 1, p. 117–133, 2017.

BRADL. H. B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 277, n. 1, p. 1–18, 2004.

BRADY. N.; WEIL. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**.

BRANDSTETTER. A. et al. **Remediation engineering of contaminated soils**. New York: [s.n.]. 2000.

BRANZINI. A.; GONZÁLEZ. 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.

CAMPOS. M. C. C. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais. **Agrárias e Ambientais**, v, 6, n, 3, p, 547–565, 2010.

CHAVES. L. H. G. et al. Crescimento, distribuição e acúmulo de cobre e zinco em plantas de pinhão-manso. **Revista Ciência Agronômica**, v, 41, n, 2, p, 167–176, 2010.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Sexto levantamento. Safra 2016/17. v.4. n.6. Brasília. DF. 2017.

CONAMA. **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Disponível em: <<http://sapotecsul.com.br/sapotec/DOWNLOADS/CONAMA420.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2019.

DIPU. S.; KUMAR. A. A.; THANGA. S. G. Effect of chelating agents in phytoremediation of heavy metals. **Remediation Journal**, v, 22, n, 2, p, 133–146, 2012.

FADIGAS. F. D. S. et al. Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. **Bragantia**, v, 61, n, 2, p, 151–159, 2002.

FAO. FAOSFAT –Agricultural statistics data base. Rome: World Agriculture Information Centre. 2014. Disponível em: <[www.fao.org/faostat](http://www.fao.org/faostat)>. Acesso em: 20 fev. 2019.

FEPAM. **Portaria FEPAM N.º 85/2014 Dispõe**. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/legislacao/arq/Portaria085-2014.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2019.

FETTER. C. W. **Applied hydrogeology**. 4. ed. Upper Saddle River. New Jersey: Prentice Hall. 2001.

FUKSOVÁ. Z.; SZÁKOVÁ. J.; TLUSTOŠ. P. Effects of co-cropping on bioaccumulation of trace elements in *Thlaspi caerulescens* and *Salix dasyclados*. **Plant, Soil and Environment**, v. 55, n. 11, p, 461–467, 2009.

GALRÃO. E. Z. Métodos de aplicação de cobre e avaliação da disponibilidade para a soja num latossolo vermelho-amarelo franco-argilo-arenoso fase cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 265–272, 1999.

GATIBONI. L. C. et al. **Proposta de limites críticos ambientais de fósforo para solos de santa catarina**. Lages- SC: [s.n.]. 2014.

GONÇALVES. M. S. et al. Adequação Dos Modelos De Langmuir E Freundlich Na Adsorção De Cobre Em Solo Argiloso Do Sul Do Brasil. **Holos**, v. 4, p. 37–44, 2013.

JORIS. H. A. W. et al. Adsorção de metais pesados após calagem superficial em um Latossolo Vermelho sob sistema de plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 1, p. 1–10, 2012.

KABATA-PENDIAS. A. **Trace Elements in Soils and Plants**. 4. ed. London. Boca Raton:

[s.n.]. 2001.

KOPTSİK. G. N. Problems and prospects concerning the phytoremediation of heavy metal polluted soils: A review. **Eurasian Soil Science** v. 47, n. 9, p. 923–939, 2014.

LOPES. C. et al. Adsorção de Cu e Zn num Latossolo Vermelho tratado com dejetos suínos. **Revista Ceres**, v. 61, n. 6 p. 997–1005, 2014.

LUX. A. et al. Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity. **Physiologia Plantarum**, v. 120, n. 4, p. 537–545, 2004.

MAHMUD. R. et al. Assessment of potential indigenous plant species for the phytoremediation of arsenic-contaminated areas of Bangladesh. **International Journal of Phytoremediation**, v. 10, n. 2, p. 119–132, 2008.

MALLMANN. F. J. K. et al. Manejos indicados pela pesquisa para mitigar o excesso de metais pesados nos solos do sul do Brasil. In: TIECHER. T. (Org.). **Manejo e Conserv. do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Bras. práticas Altern. manejo visando a Conserv. do solo e da água**. Porto Alegre: UFRGS. 2016. p. 187.

MANN. S. S.; RITCHIE. G. S. P. Changes in the Forms of Cadmium with Time in Some Western Australian Soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 32, n. 2, p. 241–250, 1993.

MCGRATH. S. P.; ZHAO. F. J. **Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils**. **Current Opinion in Biotechnology**. [S.l: s.n.]. . 2003

MCLAUGHLIN. M. J. et al. Review: a bioavailability-based rationale for controlling metal and metalloid contamination of agricultural land in Australia and New Zealand. **Australian Journal of Soil Research**, v. 38, p. 1037–1086, 2000.

MEDINA. E. F. et al. Seleção de solos da região de viçosa para utilização como barreira química para metais pesados. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 04, n. 3, p. 1–6, 2018.

MELO. E. E. C. et al. Accumulation of arsenic and nutrients by castor bean plants grown on an As-enriched nutrient solution. **Journal of Hazardous Materials**, v. 168, n. 1, p. 479–483, 2009.

MIYAZAWA. M. et al. Análise química de tecido vegetal. In: SILVA. F. C. (Org.). **Man. análises químicas solos. plantas e Fertil**. 2. ed. Brasília: Embrapa informação tecnológica. 2009. p. 193–233.

MOREIRA. C. S. et al. Nickel adsorption in two Oxisols and an Alfisol as affected by pH. nature of the electrolyte. and ionic strength of soil solution. **Journal of Soils and Sediments**,

v. 8, n. 6, p. 442–451, 2008.

MOREIRA. C. S.; ALLEONI. L. R. F. Adsorption of Cd, Cu, Ni and Zn in tropical soils under competitive and non-competitive systems. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 3, p. 301–307, 2010.

NASCIMENTO. C. W. A.; FONTES. R. L. F. Correlação entre características de latossolos e parâmetros de equações de adsorção de cobre e zinco. **Rista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 965–971, 2004.

OLIVEIRA. F. C.; MATTIAZZO. M. E. Mobilidade de metais pesados em um Latossolo Amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 4, p. 807–812, 2001.

OLIVEIRA. F. S. D. **Utilização de resíduos de construção e demolição reciclados na sorção de Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup> e As<sup>5+</sup>**. 2015. 109 f. Universidade Federal de Viçosa. 2015.

PANZIERA. A. G. et al. Potencial de fitoextração de cobre por aveia preta em área de vinhedos no sul do Brasil. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 26, n. 6, p. 565–573, 2018.

RESENDE. Á. V. de et al. **Adubação maximiza o potencial produtivo do sorgo 119**. Sete Lagoas. MG: Embrapa Milho e Sorgo. 2009.

\_\_\_\_\_. **Protocolo de Avaliação Agronômica de Rochas e Produtos Derivados como Fontes de Nutrientes às Plantas ou Condicionadores de Solo**. . Sete Lagoas. MG: [s.n.]. . 2012

RHODEN. A. C. et al. Parâmetros Químicos Do Solo Influenciados Por Aplicação De Dejetos De Suínos Em Áreas Agrícolas Do Oeste Catarinense. **Revista de Ciências Agroveterinárias e Alimentos**, v. 2, p. 1–10, 2017.

RUYTERS. S. et al. Copper toxicity in soils under established vineyards in Europe: A survey. **Science of the Total Environment**, v. 443, p. 470–477, 2013.

SACRISTÁN. D.; ROSSEL. R. A. V.; RECATALÁ. L. Proximal sensing of Cu in soil and lettuce using portable X-ray fluorescence spectrometry. **Geoderma**, v. 265, n. 90, p. 6–11, 2016.

SAS. L. E. **Getting started with the SAS Learning Edition**. . Cary: [s.n.]. . 2000

SCHEID. D. L. et al. Turfa como indutor do crescimento e tolerância de Erythrina crista-galli em solo contaminado com zinco. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 4, p. 924–932, 2018.

SECCO. D. et al. Culturas Em Um Latossolo Vermelho Argiloso Sob Diferentes. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 29, n. 4, p. 407–414, 2005.

- SFREDO. G. J.; BORKERT. C. M. **Deficiências e toxicidades de nutrientes em plantas de soja**. Londrina: Embrapa Soja. 2004.
- SILVA. A. G. DA et al. Consórcio de sorgo granífero com braquiárias na safrinha para produção de grãos e biomassa alessandro. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 16, n. 3, p. 495–508, 2017.
- SILVEIRA. M. L. A. et al. Energia livre da reação de adsorção de cádmio em latossolos ácidos. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 4, p. 1117–1122, 1999.
- SOUZA. E. L. de et al. Resíduos Contaminantes No Solo: Possibilidades E Consequências. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 484–509, 2018.
- STIGLIANI. W. M. Changes in valued “capacities” of soils and sediments as indicators of nonlinear and time-delayed environmental effects. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 10, p. 245–246, 1988.
- TEDESCO. M. J. et al. **Análise de solo. plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS. 1995.
- TURRA. C.; FERNANDES. E. A. N.; BACCHI. M. A. Evaluation on rare earth elements of Brazilian agricultural supplies. **Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology**, v. 3, n. 4, p. 86–92, 2011.
- USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Method 3050 B: Acid digestion of sediments. sludges. and soils. Washington. 1996. 12p.
- VITTI. G. C.; TREVISAN. W. Manejo de macro e micronutrientes para alta produtividade da soja. **Potafos**, p. 1–16, 2000.
- WILKINS. R. Mental handicap-thirty years on ? **British Journal of Learning Disabilities**, v. 5, n. 4, p. 4–7, 1978.
- YOON. J. et al. Accumulation of Pb. Cu. and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. **Science of the Total Environment**, v. 368, n. 2–3, p. 456–464, 2006.

## **5 CAPÍTULO 3 – BACTÉRIAS FIXADORAS DE NITROGÊNIO PARA O DESENVOLVIMENTO DE SORGO EM SOLO CONTAMINADO COM COBRE**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

O sorgo (*Sorghum bicolor* L.) é o quinto cereal mais importante do mundo, superado apenas por trigo, arroz, milho e cevada. É cultivado em áreas e situações ambientais muito secas e/ou muito quentes, onde a produtividade de outros cereais é antieconômica (AWIKA; ROONEY, 2004). O cultivo do sorgo tem relevância para a produção de bioenergia, como uma fonte renovável de matéria-prima, além de ser utilizado como base da alimentação humana de milhões de pessoas e para alimentação animal (MACIEL et al., 2019b; MUTISYA et al., 2009; ULLMANN et al., 2018). O nitrogênio (N) é também o nutriente mais limitante e o mais requerido pelo sorgo, sendo que seu acúmulo ocorre linearmente até a maturação (LIMA et al., 2013). Suas necessidades são altas, podendo chegar, por exemplo, a 200 kg de N ha<sup>-1</sup> para obtenção da maior produtividade de massa fresca total para o sorgo sacarino BRS 506 (JARDIM et al., 2015).

Atualmente um enorme volume de compostos orgânicos e inorgânicos são produzidos, industrializados, transportados e consumidos, dentre esses compostos os metais são considerados um grupo de grande relevância ambiental, devido a sua capacidade de bioacumulação nos níveis tróficos e sua permanência no solo, constituindo fator de contaminação (SILVA et al., 2019). Um solo é considerado contaminado se a concentração da substância de interesse estiver acima de um dado limite, denominado valor de intervenção, indicando risco de efeito deletério sobre a saúde humana por ter a chance de danificar qualquer atividade biológica existente no organismo e gerar tantos tipos de resposta quantas forem as atividades (BORGES JÚNIOR et al., 2008; MOREIRA; MOREIRA, 2004; SILVA et al., 2019). O uso de plantas para recuperação de áreas contaminadas é conhecido como fitorremediação, e tem mostrado potencial para tratamento de diferentes grupos de contaminantes, especialmente o metal cobre (AGNELLO et al., 2016).

Devida a expressiva produção de grãos, tanto no contexto mundial como no nacional faz-se necessário um aumento da produtividade, sem que ocorram acréscimos na área cultivada. Uma das soluções é a busca por produtos e tecnologias que apresentem bons resultados e ainda possuam baixo custo (MAURÍCIO FILHO; SILVA; SOUZA, 2018). A

fixação biológica de nitrogênio (FBN) é reconhecida por diminuir o custo da produção e a dependência do agricultor por insumos industrializados (MEDEIROS et al., 2007).

No Brasil, o melhor exemplo de utilização deste processo é na cultura da soja, onde a adubação química nitrogenada é totalmente substituída pela utilização de inoculantes contendo bactérias do gênero *Bradyrhizobium*. A utilização desta tecnologia representa uma economia para o país, de cerca de US\$ 3 bilhões em fertilizantes nitrogenados (MERCANTE, 2005). Pesquisas demonstraram que a inoculação de bactérias diazotróficas em plantas de sorgo promove respostas significativas (BERGAMASCHI et al., 2007). Entre as espécies de microrganismos que realizam a fixação de nitrogênio nas raízes das gramíneas, a bactéria *Azospirillum brasilense* é a mais estudada para inoculação de gramíneas no campo (NUMOTO et al., 2019), sendo recomendado por muitos pesquisadores no Brasil (ARAÚJO et al., 2014; HUNGRIA; NOGUEIRA; ARAUJO, 2016; OLIVARES et al., 2006).

Diversos gêneros de bactérias são capazes de crescer em solos com altas concentrações de metais (UZEL; OZDEMIR, 2009). Um sistema de biossorção de metal, que consistiu na combinação simbiótica entre uma estirpe de *Cupriavidus taiwanensis*, tolerante a chumbo, cádmio e cobre, e a planta hospedeira *Mimosa pudica* foi avaliado para a remoção de metais no solo, as plantas de *M. pudica* aumentaram consideravelmente sua capacidade de absorção de Cu, Cd e Pb, quando em simbiose com a estirpe *Cupriavidus taiwanensis* TJ208 (CHEN et al., 2008). Estirpes de *Cupriavidus necator* são capazes de formar nódulos efetivos em leguminosas da subfamília Faboideae (syn, Papilionoideae) e Mimosoideae (FLORENTINO et al., 2009), e também têm a capacidade de tolerar altas concentrações de metais pesados. Assim, por estas características as bactérias fixadoras de nitrogênio no solo, estas apresentam potencialidades para experimentos visando a biorremediação de solos contaminados com metais pesados, em associação com a produção de espécies vegetais (MATSUDA; MOREIRA; SIQUEIRA, 2004).

A utilização de bactérias fixadoras de nitrogênio possibilita o desenvolvimento e o crescimento de sorgo em solo contaminado com cobre. Neste contexto este trabalho tem por objetivo avaliar a resposta da inoculação com *Azospirillum brasilense* na cultura do sorgo cultivado em solo contaminado com cobre.

## 5.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado e conduzido em ambiente protegido, casa de vegetação pertencente ao departamento de Engenharia Florestal do Campus da UFSM Frederico Westphalen. Neste trabalho foi utilizado um solo coletado em horizonte subsuperficial (horizonte A) caracterizado como Latossolo Vermelho aluminoférrico (SANTOS, 2013), ao qual foi misturado areia, possibilitando a elaboração de um solo com textura desejada para o experimento. No sentido de elaborar o solo com o teor de argila desejado, seguiu-se a metodologia proposta por Gatiboni et al., (2014). O solo utilizado continha inicialmente 70% de argila, para a elaboração da textura foi realizada a mistura de areia e solo na proporção 75% solo + 25% de areia. Ao final do processo o solo elaborado apresentou teor de 52,5 % de argila.

Após a coleta, o solo foi secado em estufa com aeração forçada a  $65\pm 1^\circ\text{C}$ , moído e peneirado em malha de 2 mm, sendo analisado no laboratório de química do solo cujas características física e química são apresentadas na Tabela 1, conforme metodologia descrita por Mann e Ritchie, (1993) para o cobre trocável (extrator KCl  $0,005\text{ mol L}^{-1}$ ) e Tedesco et al., (1995) para os demais elementos dos solos utilizados no experimento.

Após a análise química foi adicionado calcário em quantidade para atingir pH em água de 6,5, sendo então incubado por 45 dias. Durante a incubação o solo foi acondicionado em vasos e a umidade mantida em 80 % da capacidade de campo, para estabilização de propriedades físico-químicas.

Tabela 1– Caracterização física e química do solo utilizado para cultivo da cultura do sorgo inoculado com fixadores de nitrogênio e com aplicação de doses de cobre no solo.

Atributo	pH	MO	P	K	Mg	Al+H	Cu	Zn
Textura	01:01	%	mg/dm <sup>3</sup>					
52,50%	6,5	0,88	0,8	22,86	1,82	1,91	7,19	0,58

Após a incubação o solo foi esterilizado em autoclave com temperatura de  $121^\circ\text{C}$  em 3 ciclos de 30 minutos, foi realizado a contaminação dos solos com cobre, sendo as doses

aplicadas 30 dias antes da semeadura, na forma de solução de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), sendo homogeneizados no solo por agitação em saco plástico.

A cultivar de sorgo utilizada foi o híbrido TAMBO BMR. Para o cultivo das plantas em casa de vegetação foi utilizado vasos de plástico com capacidade de um litro, preenchidos com 0,9 kg de solo. Em cada vaso foi semeado 5 sementes, as quais foram desinfestadas com hipoclorito de sódio 2 %, por 15 minutos e lavadas em água corrente por 5 minutos, sendo realizado o desbaste oito dias após a germinação, deixando 3 plantas por vaso até o final do experimento. A irrigação foi realizada diariamente com água por meio de um sistema de irrigação automática por gotejamento, mantendo a umidade a 80% da capacidade de campo.

O experimento com o sorgo foi em DBC em arranjo fatorial ( $9 \times 2$ ), sendo, nove doses de cobre (0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240 e 300 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo) com inoculação e sem inoculação. No tratamento sem inoculação do experimento com sorgo, foi realizada aplicação de nitrogênio na dose de 200  $\text{kg}^{-1}$  ha seguindo a interpretação da análise de solo para uma produção de 4 t de grãos  $\text{ha}^{-1}$ .

O inoculante utilizado foi fornecido pela empresa Total Biotecnologia Indústria e Comércio Ltda, com sede no município de Curitiba – PR, sendo desenvolvidos pela Total Biotecnologia e EMBRAPA. Utilizou-se o inoculante líquido Azo Total Max® composto por bactérias do gênero *Azospirillum brasilense* (AbV5 e AbV6) na concentração de  $7 \times 10^9$  UFC  $\text{ml}^{-1}$ , na dose de 2  $\text{ml kg}^{-1}$  de semente, que resultou na concentração de 2,000,000 UFC por semente, ambos inoculantes foram homogeneizados com as sementes no momento da semeadura.

A determinação do índice relativo de clorofila (IRC) das folhas foi realizada por meio de clorofilômetro portátil (ClorofiLOG®, Falker, Porto Alegre, modelo CFL 1030) (FALKER, 2008), que fornece resultados em unidades adimensionais chamados valores de IRC e trabalha com leituras em dois comprimentos de onda, mensurou-se o IRC na folha superior totalmente expandida na cultura do sorgo e na folha central do último trifólio, executando-se três leituras por folha, aos 60 dias após a semeadura das culturas.

Ao final do ciclo do experimento, cerca de 100 dias após a semeadura das culturas, foram quantificados: altura de planta, (AP) medido a altura do colo da planta até a ponta da folha bandeira; o diâmetro do colo (DC), com paquímetro digital (Black Jack®) na região do hipocótilo da planta; volume de raiz (VR), com auxílio de uma proveta graduada; comprimento de raiz; massa seca radicular (MSR) e da parte aérea (MSPA), sendo a planta seccionada na região do colo e ambas as partes secas em estufa a  $65 \pm 1$  °C até massa constante e pesadas em balança analítica.

Após a coleta das plantas, antes de serem submetidas à secagem em estufa, as raízes foram lavadas, com auxílio de peneiras de 1,0 mm e 0,5 mm de malha, sendo retirada uma amostra de 0,1 g para avaliação da área superficial específica (ASE), conforme Tennant, (1975). A massa seca das raízes e a parte aérea foram moídas em moinho tipo Wiley com peneira de malha de 10 mesh para a determinação dos teores de cobre extraível (Cu), através de digestão nítrico-perclórica (3:1) e determinação em espectrofotometria de absorção atômica, conforme descrito por (MIYAZAWA et al., 2009) e determinado o Cu total nos tratamentos aplicados.

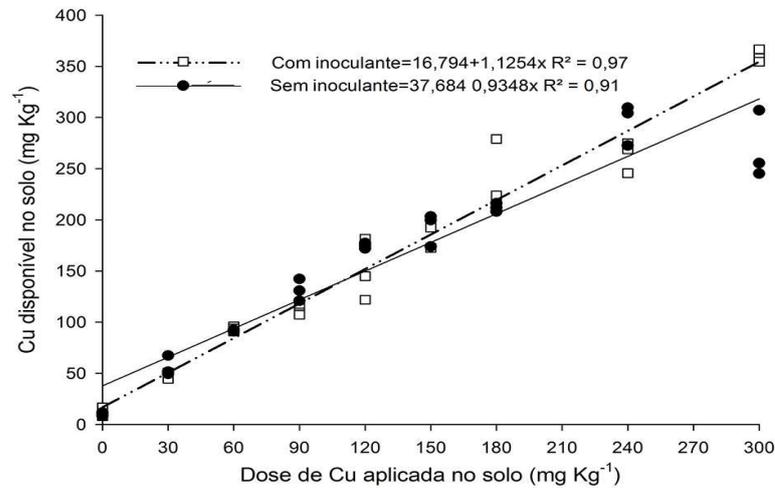
Os resultados foram submetidos a análise de variância através do Software “Statistical Analysis System” (SAS, 2000). Aos parâmetros com interação significativa entre os fatores de variação (dose e inoculação) desmembraram-se as doses de cobre dentro da inoculação e em caso de não haver interação significativa foram desmembrados os efeitos simples e aplicada análise de regressão polinomial para dose e Tukey para inoculação a 5%. Nos casos em que nenhum grau do polinômio teve significância, aplicou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

### 5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve aumento linear de cobre disponível no solo sob cultivo de sorgo com inoculação de *Azospirillum brasilense*, aplicação de nitrogênio e doses de cobre no solo (Figura 1), assim a disponibilidade de cobre no solo não é afetada pela forma de obtenção de nitrogênio pela cultura do sorgo.

O diâmetro de colmo, altura de planta, número de folhas, massa seca de parte aérea, massa seca de raiz, área foliar, clorofila B e clorofila A não evidenciaram interação significativa entre doses e inoculação, havendo apenas efeito simples significativo da inoculação para (DC, AP, MSP, AF, Cl B e Cl A), sendo as plantas de sorgo inoculadas com *Azospirillum brasilense* superiores as não inoculadas que receberam apenas adubação mineral nitrogenada (Tabela 2). A redução do diâmetro pode tornar as plantas mais sensíveis ao acamamento e ao quebramento, afetando negativamente a colheita da cultura (MAY et al., 2012).

Figura 1– Cobre disponível no solo sob cultivo de sorgo com inoculação de *Azospirillum brasilense*, aplicação de nitrogênio e doses de cobre no solo.



A altura de plantas no sorgo forrageiro é uma característica de grande importância, pois plantas com porte elevado tendem a produzir maiores quantidades de matéria seca (OLIVEIRA et al., 2016). A área foliar é uma das variáveis de crescimento mais afetadas quando as plantas são submetidas a algum tipo de estresse, portanto, o seu desenvolvimento das plantas é afetado à medida que a área foliar é reduzida, em virtude da menor capacidade fotossintética (FALQUETO et al., 2010) e, conseqüentemente, menor acúmulo de massa seca (AMBEDE et al., 2012). Vários trabalhos têm demonstrado os benefícios do uso de inoculantes do gênero *Azospirillum* em gramíneas, tais como aumento na produtividade de grãos, aumento da matéria seca, diâmetro de colmo e altura de planta (ANDRADE et al., 2016; COELHO et al., 2018; NOVAKOWISKI et al., 2011; QUADROS et al., 2014). Desse modo, a inoculação com *Azospirillum brasilense* possibilita aumento significativo nos parâmetros fenológicos do sorgo, superando a adubação nitrogenada, recomendado pela literatura.

A inoculação com *Azospirillum brasilense* possibilitou maiores médias de clorofila A e B de sorgo (Tabela 2). O nitrogênio possui papel fundamental na cultura do sorgo, por ser constituinte essencial das proteínas e interferir diretamente no processo fotossintético, pela sua participação na molécula de clorofila (FRIAS et al., 2018), interferindo diretamente na composição química de espécies forrageiras (SIMILI et al., 2008), assim, plantas de sorgo inoculadas com *Azospirillum brasilense* são nutricionalmente melhores que plantas de sorgo

sem inoculação, então a inoculação de sorgo potencializa a capacidade produtiva de massa na cultura do sorgo.

Tabela 2- Médias de diâmetro de colmo (DC), altura de planta (AP), número de folhas (NF), massa seca de parte aérea (MSP), massa seca de raiz MSR) e área foliar (AF), clorofila B (Cl B) e Clorofila A (Cl A) de plantas de sorgo com ou sem inoculação com *Azospirillum brasilense*.

Inoculação*	DC (mm)	AP (cm)	NF	MSPA (g)	MSR (g)	AF (cm <sup>2</sup> )	Cl B (IRC)	Cl A (IRC)
Com	7,24 a	70,25 a	5,56 a	4,08 a	1,58 a	319,2 a	7,3 a	32,3 a
Sem	5,01 b	52,42 b	5,12 a	1,87 b	0,79 a	193,26 b	6,4 b	30,4 b

\*Com ou sem inoculação de *Azospirillum brasilense*

Houve diferença significativa do efeito das doses de cobre aplicadas no solo para comprimento radicular (CR), massa seca de raízes (MSR), número de folhas (NF), massa seca de parte aérea (MSPA), e área foliar (AF) do sorgo (Tabela 3), no entanto não foi possível ajuste para nenhum grau do polinômio para regressões, com isso, procedeu-se análise de comparação de médias. Dessa forma, apesar das médias serem semelhantes até a dose de 180 para o CR e 240 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo para MSR, MSPA e AF, destaca-se que a maior dose possibilitou médias menores mesmo não havendo diferença estatística. Plantas submetidas a doses elevadas de cobre podem apresentar decréscimos de área foliar, massa seca de parte aérea e no comprimento radicular (PANZIERA et al., 2018; SANTOS et al., 2008), Assim, acréscimos de cobre no solo causam efeito negativo no CR, MSR, MSPA e AF de sorgo, sendo um fator restritivo para o seu desenvolvimento.

Houve interação significativa entre doses de cobre e inoculação para o teor de cobre na parte aérea e na raiz cultura do sorgo (Figura 2). Para o teor de cobre na parte aérea no tratamento com inoculação de *Azospirillum brasilense* apresentou resposta quadrática negativa com ponto de mínima partindo da dose zero de cobre para o teor de cobre na parte aérea, porém com a aplicação de cobre no solo houve incrementos do metal nos tecidos da parte aérea, sendo significativamente menor que as plantas sem inoculação (Figura 2). Rizobactérias resistentes a metais pesados podem auxiliar a aquisição destes contaminantes de solos por meio do auxílio de crescimento de plantas fitoextratoras (ESTRELA; CHAVES; SILVA, 2018). Esta é uma importante estratégia para recuperar áreas contaminadas com

cobre (RAJKUMAR; FREITAS, 2008), considerando que os valores médios de cobre na parte aérea de sorgo encontrados neste experimento ficam entre 10 e 30 mg kg<sup>-1</sup> (MARTINEZ et al., 1999). Neste contexto, a inoculação de sorgo com *Azospirillum brasilense* possibilita um menor teor de cobre na parte aérea das plantas de sorgo, possibilitando o cultivo de sorgo em áreas contaminadas com cobre sem que ocorra aumento nos teores do metal na parte aérea.

Tabela 3 - Comprimento radicular (CR), massa seca de raízes (MSR), massa seca de parte aérea (MSP), e área foliar (AF) de sorgo cultivado com doses de cobre no solo.

Doses *	CR (cm)	MSR (g)	MSPA (g)	AF (cm <sup>2</sup> )
0	52 a	2,1 a	4,6 a	288,4 ab
30	43,7 ab	1,64 ab	3,7 ab	296,1 ab
60	38,7 ab	1,0 ab	2,7 abc	255 ab
90	43,7 ab	0,8 b	2,4 bc	212 ab
120	45,5 ab	1,4 ab	2,9 abc	305,5 a
150	44,9 b	1,1 ab	3,3 abc	286,7 ab
180	43,7 ab	1,0 ab	2,2 bc	241,9 ab
240	35,6 b	1,0 ab	2,5 abc	273,6 ab
300	33 b	0,6 b	1,5 c	128,6 b

\* (mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo)

As curvas de resposta do sorgo com e sem inoculação para o teor de cobre nas raízes apresentaram incrementos lineares ao aumento das doses de cobre no solo (Figura 2), alcançando 500 mg kg<sup>-1</sup> de MSR na maior dose testada. Esse resultado corrobora com os de (ZANCHETA et al., 2011) que também evidenciaram que a retenção de Cu nas raízes é resultado de um mecanismo de tolerância ao excesso do metal, e conseqüentemente, a redução da presença de íons livres para transporte à parte aérea (LASAT, 2002). Nesta análise com o acréscimo na dose de cobre no solo, o sorgo aumenta o acúmulo de cobre nas raízes, independente se a cultura foi ou não inoculação com *Azospirillum brasilense*.

Houve interação significativa entre doses de cobre e inoculação na cultura do sorgo para volume e área superficial radicular de sorgo (Figura 3 A). O volume de raiz da cultura do sorgo adubada sem inoculação reduziu linearmente com as doses de cobre no solo e, apesar de não possibilitar ajuste para nenhum grau do polinômio o volume de raiz com inoculação de *Azospirillum brasilense* apresentou em todas as doses, médias superiores ao tratamento sem inoculação (Figura 3 A). A literatura relata que a inoculação com bactérias diazotróficas apresenta tendência de aumento no volume de raízes de gramíneas (QUADROS et al., 2014), cujos resultados podem ser atribuídos tanto ao efeito da fixação biológica do nitrogênio ou

dos mecanismos de promoção do crescimento, que maximizam o volume radicular e a capacidade das plantas em absorver e assimilar nutrientes do solo (DOBBELAERE et al., 2001).

Figura 2 - Teores de cobre na parte aérea e radicular de sorgo com e sem inoculação de *Azospirillum brasilense*, cultivado com doses de cobre no solo.

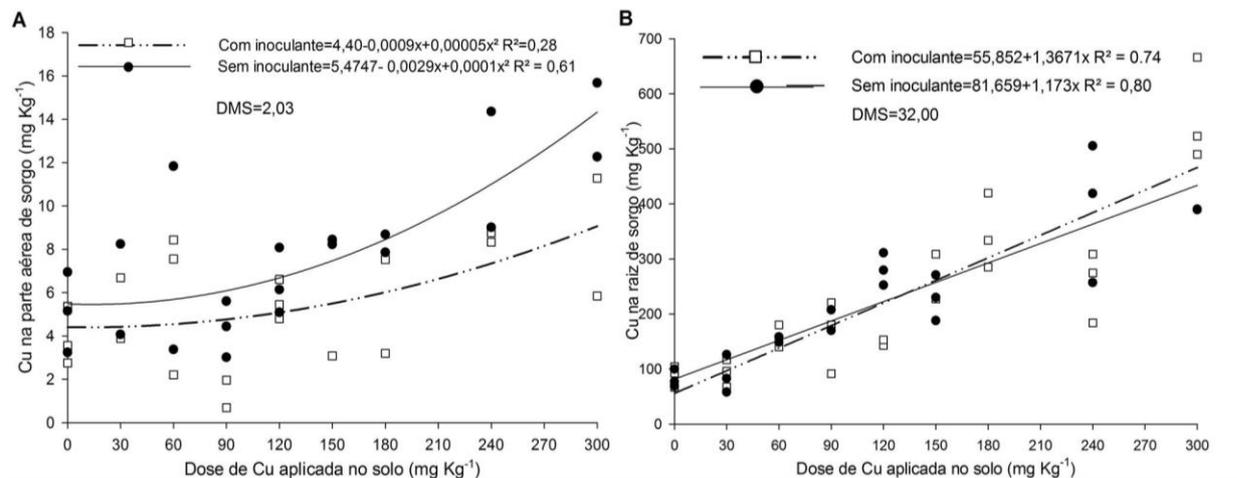
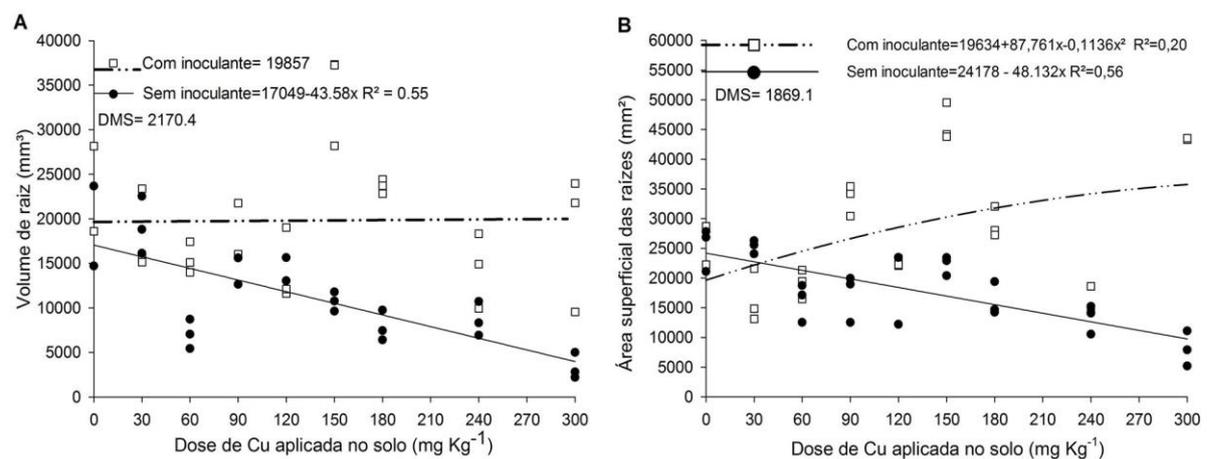


Figura 3 - Volume (VOL) e área superficial específica (ASE) radicular de sorgo com inoculação de *Azospirillum brasilense*, aplicação de nitrogênio e doses de cobre no solo.



O aumento da dose de cobre no solo diminuiu linearmente a área superficial específica de raízes de sorgo sem inoculação, enquanto que as raízes com inoculação de *Azospirillum brasilense* apresentaram comportamento quadrático com ponto de máxima na dose de

386,272 mg de cobre  $\text{kg}^{-1}$  de solo sendo significativamente maior que o tratamento sem inoculação (Figura 3 B). A inoculação com *Azospirillum brasilense* possibilitam a modificação na arquitetura da raiz da planta, que ocasiona o aumento de pêlos radiculares e raízes laterais e encurvamento do comprimento das raízes, por consequência um aumento da superfície radicular, o que possibilita maior absorção de nutrientes do solo e de exsudação radicular (SPAEPEN; VANDERLEYDEN, 2011). O aumento da área superficial específica de raízes possibilita maior capacidade de absorção de água e nutrientes do solo (QUADROS et al., 2014), assim, a inoculação de sorgo por RPCP proporciona aumento da área superficial de raízes em comparação com plantas não inoculadas, cultivadas somente com adubação nitrogenada.

#### 5.4 CONCLUSÕES

A inoculação com *Azospirillum brasilense* proporciona aumento da área superficial específica de raízes de sorgo em comparação com plantas não inoculadas cultivadas com adubação nitrogenada com aumento de doses de cobre no solo.

A inoculação com *Azospirillum brasilense* possibilita maior desenvolvimento da parte aérea do sorgo e reduz teor de cobre na parte aérea.

Com o aumento da disponibilidade de cobre no solo em função da aplicação do mesmo, há melhoria de alguns atributos da cultura do sorgo quando da inoculação com *Azospirillum brasilense*.

#### 5.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGNELLO. A. C. et al. Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation. phytoremediation. bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation. **Science of the Total Environment**, v. 563–564, p. 693–703, 2016.

AMBEDE. J. G. et al. NaCl salinity affects germination. growth. physiology. and biochemistry of bambara groundnut. **Brazilian Society of plant Physiology**, v. 24, n. 3, p. 151–160, 2012.

- ANDRADE. A. T. et al. Produtividade de milho em função da redução do nitrogênio e da utilização de *Azospirillum brasilense*. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 15, n. 2, p. 229–239, 2016.
- ARAÚJO. R. M. et al. Resposta do milho verde à inoculação com *Azospirillum brasilense* e níveis de nitrogênio. **Ciência Rural**, v. 44, n. 9, p. 1556–1560, 2014.
- AWIKA. J. M.; ROONEY. L. W. Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. **Phytochemistry**, v. 65, n. 1, p. 1119–1221, 2004.
- BERGAMASCHI. C. et al. Ocorrência de bactérias diazotróficas associadas a cultivares de sorgo forrageiro. **Ciência Rural**, v. 37, n. 3, p. 727–733, 2007.
- BORGES JÚNIOR. M. et al. Valores de referência local e avaliação da contaminação por zinco em solos adjacentes a áreas mineradas no município de Vazante-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. spe, p. 2883–2893, 2008.
- CHEN. W. M. et al. Metal biosorption capability of *Cupriavidus taiwanensis* and its effects on heavy metal removal by nodulated *Mimosa pudica*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 151, p. 364–371, 2008.
- COELHO. B. A. et al. Produtividade do milho cultivado em baixa latitude na entressafra inoculado com *Azospirillum brasilense* com diferentes doses de nitrogênio. **Journal of Bioenergy and Food Science**, v. 6, n. 1, p. 18–28, 2018.
- DOBBELAERE. S. et al. Responses of agronomically important crops to inoculation with *Azospirillum*. **Functional Plant Biology**, v. 28, n. 9, p. 871–879, 2001.
- ESTRELA. M. A.; CHAVES. L. H. G.; SILVA. L. N. Fitorremediação como solução para solos contaminados por metais pesados Phytoremediation. **Revista Ceuma Perspectivas**, v. 31, p. 160–172, 2018.
- FALKER. A. AGRÍCOLA. **Manual do medidor eletrônico de teor clorofila (ClorofiLOG/CFL 1030)**Porto Alegre. 2008.
- FALQUETO. ANTELMO R. et al. Chlorophyll fluorescence in rice-grain yield capacity (2010).pdf. **brazilian society of plant physiology**, v. 22, n. 1, p. 35–41, 2010.
- FLORENTINO. L. A. et al. *Sesbania virgata* stimulates the occurrence of its microsymbiont in soils but does not inhibit microsymbionts of other species. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 5, p. 667–676, 2009.
- FRIAS. D. B. DE et al. Produtividade e qualidade do sorgo forrageiro na região norte do paraná submetido a diferentes níveis de aduba o nitrogenada. **Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa**, v. 34, n. Especial, p. 321–332, 2018.
- GATIBONI. L. C. et al. **Proposta de limites críticos ambientais de fósforo para solos de santa catarina**. Lages- SC: [s.n.].
- HUNGRIA. M.; NOGUEIRA. M. A.; ARAUJO. R. S. Inoculation of *Brachiaria* spp. with the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*: An environment-friendly component in the reclamation of degraded pastures in the tropics. **Agriculture. Ecosystems**

**and Environment**, v. 221, p. 125–131, 2016.

JARDIM. C. A. et al. Adubação nitrogenada na produção de sorgo sacarino brs 506 para alimentação animal. **Ciência & Tecnologia: Fatec-JB**, v. 7, n. 2015, p. 37–41, 2015.

LASAT. M. M. Phytoextraction of Toxic Metals: A Review of Biological Mechanisms. **Journal of Environmental Quality**, v. 31, p. 109–120, 2002.

LIMA. C. G. et al. Aplicação de diferentes doses de uréia polimerizada sob o desenvolvimento vegetativo de plantas de sorgo sacarino. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 224–232, 2013.

MACIEL. M. P. . et al. Archivos de Zootecnia. **Archivos de Zootecnia**, v. 68, n. 261, p. 100–108, 2019.

MANN. S. S.; RITCHIE. G. S. P. Changes in the Forms of Cadmium with Time in Some Western Australian Soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 32, n. 2, p. 241–250, 1993.

MARTINEZ. H. E. P.; CARVALHO. J. G. DE; SOUZA. R. B. DE. Diagnose foliar. In: RIBEIRO. A. C.; GUIMARÃES. P. T. G.; ALVAREZ. V. V. H. (Eds.). . **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. 1999. p. 143–168.

MATSUDA. A.; MOREIRA. F. M. S.; SIQUEIRA. J. O. Sobrevivência de *Bradyrhizobium* e *Azorhizobium* em misturas de solo contaminadas com metais pesados. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 26, p. 249–256, 2004.

MAURÍCIO FILHO. J.; SILVA. C. H. S.; SOUZA. J. E. B. DE. Inoculação de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum brasilense* agronomic performance and productivity of soybean culture with co- inoculation of *Bradyrhizobium* e *Azospirillum brasilense* Introdução A cultura da soja ( *Glycine max* ( L . ) Merrill ) tem grande relevân. **Ipê Agronomic Journal**. v. 2. n. 2018. p. 48–59. 2018.

MAY. A. et al. Variedades de sorgo sacarino em diferentes espaçamentos e população de plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 11, n. 3, p. 278–290, 2012.

MEDEIROS. E. V. DE et al. Tolerância de bactérias fixadoras de nitrogênio provenientes de municípios do Rio Grande do Norte à temperatura e salinidade Tolerance of nitrogen fixing bacteria from Counties of Rio Grande do Norte State to temperature and salinity. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 7, n. 2, p. 160–168, 2007.

MERCANTE. F. M. **Uso de inoculante garante economia de 3 bilhões de dólares na cultura da soja no país**. Disponível em: <[www.embrapa.br/noticias/artigos/folder.2005-0202.1550581232/artigo.2005-12-05.0506770395/mostra\\_artigo](http://www.embrapa.br/noticias/artigos/folder.2005-0202.1550581232/artigo.2005-12-05.0506770395/mostra_artigo)>. Acesso em: 15 fev. 2019.

MIYAZAWA. M. et al. Análise química de tecido vegetal. In: SILVA. F. C. (Ed.). . **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa informação tecnológica. 2009. p. 193–233.

MOREIRA. F. R.; MOREIRA. J. C. Importância da análise de especiação do chumbo em

plasma para a avaliação dos riscos à saúde. **Química Nova**, v. 27, n. 2, p. 251–260, 2004.

MUTISYA. J. et al. Diurnal oscillation of SBE expression in sorghum endosperm. **Journal of Plant Physiology**, v. 166, n. 4, p. 428–434, 2009.

NOVAKOWISKI. J. H. et al. Efeito residual da adubação nitrogenada e inoculação de *Azospirillum brasilense* na cultura do milho. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 1, p. 1687–1698, 2011.

NUMOTO. A. Y. et al. Agronomic performance and sweet corn quality as a function of inoculant doses (*Azospirillum brasilense*) and nitrogen fertilization management in summer harvest. **Bragantia**, v. 26, n. 5, p. 1–12, 2019.

OLIVARES. J. G. G. et al. Biofertilización con *Azospirillum brasilense* en sorgo. en el norte de México. **Agricultura técnica en México**, v. 32, n. 2, p. 135–141, 2006.

OLIVEIRA. R. M. D. E. et al. INTERFERÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS EM SORGO SACARINO EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS NO SEMIÁRIDO MINEIRO RENA. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 15, n. 3, p. 481–489, 2016.

PANZIERA. A. G. et al. POTENCIAL DE FITOEXTRAÇÃO DE COBRE POR AVEIA PRETA EM ÁREA DE VINHEDOS NO SUL DO BRASIL. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 26, n. 6, p. 565–573, 2018.

QUADROS. P. D. DE et al. Desempenho agrônômico a campo de híbridos de milho inoculados com *Azospirillum*. **Revista Ceres**, v. 61, n. 2, p. 209–218, 2014.

RAJKUMAR. M.; FREITAS. H. Effects of inoculation of plant-growth promoting bacteria on Ni uptake by Indian mustard. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 9, p. 3491–3498, 2008.

SANTOS. H. G. DOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa. 2013.

SANTOS. H. C. et al. Cu e Zn na cultura do sorgo cultivado em três classes de solos . I . Crescimento vegetativo e produção. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 125–130, 2009.

SAS. L. E. **Getting started with the SAS Learning Edition** Cary. 2000.

SILVA. T. J. et al. Artigo Fitorremediação de Solos Contaminados com Metais : Panorama Atual e Perspectivas de uso de Espécies Florestais. **Revista Virtual de Química**, v. 11, n. 1, p. 1–17, 2019.

SIMILI. F. F. et al. Do Híbrido De Sorgo-Sudão E Potássica : Composição Química E Digestibilidade in Vitro. **Ciência Agrotécnica**, v. 32, n. 2, p. 474–480, 2008.

SPAEPEN. S.; VANDERLEYDEN. J. Auxin and Plant-Microbe Interactions Auxin and Plant-Microbe Interactions. **Cold Spring Harbor Perspectives in Biology**, v. 7, n. 3, p. 1–13, 2011.

TEDESCO. M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS. 1995.

TENNANT. D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v. 63, n. 3, p. 995–1001, 1975.

ULLMANN. R. et al. Qualidade fisiológica das sementes de sorgo sacarino submetidas à secagem e ao armazenamento. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 26, n. 04, p. 313–321, 2018.

UZEL. A.; OZDEMIR. G. Metal biosorption capacity of the organic solvent tolerant *Pseudomonas fluorescens* TEM08. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 2, p. 542–548, 2009.

ZANCHETA. A. C. F. et al. Fitoextração de cobre por espécies de plantas cultivadas em solução nutritiva. **Bragantia**, v. 70, n. 4, p. 737–744, 2011.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A contaminação de solo por cobre devido as atividades antrópicas dificilmente poderão serem freadas, em decorrência disso, estudos precisam ser realizados a fim de atenuar os impactos gerados por essas atividades. Com isso, a utilização de plantas e microrganismos, como técnica de remediação dessas áreas pode ser considerada uma alternativa eficiente.

Os resultados obtidos nestes trabalhos revelaram que a textura de solo é fator importante em estudos prévios para implantação de soja e sorgo em áreas contaminadas com cobre, pois é causador de efeito de variações nas respostas das culturas, por consequência a parte aérea e o sistema radicular de soja e sorgo são afetados de forma negativa pela adição de cobre no solo.

O acréscimo de cobre no solo tem interação positiva com o aumento deste metal no grão da soja, assim áreas contaminadas com cobre podem ser consideradas impróprias para o cultivo desta espécie. Em concentrações acima de 180 mg de cobre kg<sup>-1</sup> de solo ocorre uma diminuição na tolerância ao cobre nas culturas da soja e do sorgo cultivados em solos com texturas de 52,5, 35 e 17,5 % de argila. Deve-se considerar o teor de cobre disponível no solo, pois mesmo em valores absolutos menores que o limite máximo de investigação agrícola podem ocorrer efeitos tóxicos nas plantas. Quanto mais argiloso um solo, maior é amplitude entre cobre disponível e Pseudo-Total.

A inoculação com *Azospirillum brasilense* proporciona aumento da área superficial específica de raízes de sorgo em comparação com plantas não inoculadas cultivadas com adubação nitrogenada e aumento de doses de cobre no solo.

A inoculação com *Azospirillum brasilense* possibilita maior desenvolvimento da parte aérea do sorgo e reduz teor de cobre em parte aérea. O aumento da disponibilidade de cobre no solo em função da aplicação do mesmo, não restringiu a atividade de *Azospirillum brasilense*, de modo que estas possibilitaram melhoria de alguns atributos da cultura do sorgo.