

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**

**RITA DE CÁSSIA FERREIRA DA SILVA**

**TEORES DE Fe, Mn, Zn E Cu EM SOLOS E CANA-DE-AÇÚCAR:  
RESERVA, DISPONIBILIDADE E CONCENTRAÇÃO NA PLANTA**

**RECIFE  
2017**



Rita de Cássia Ferreira da Silva  
Engenheira Agrônoma

**Teores de Fe, Mn, Zn e Cu em solos e cana-de-açúcar: reserva, disponibilidade e concentração na planta**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Ciências do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento

**Recife  
2017**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S586t      Silva, Rita de Cássia Ferreira da  
Teores de Fe, Mn, Zn E Cu em solos e cana-de-açúcar: reserva, disponibilidade e concentração na planta / Rita de Cássia Ferreira da Silva. – 2017.  
62 f. : il.

Orientador: Clístenes Williams Araújo do Nascimento.  
Coorientadores: Emídio Cantídio Almeida de Oliveira, Caroline Miranda Biondi.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2017.  
Inclui referências.

1. Zinco 2. *Saccharum officinarum* 3. Manganês 4. Nutrição de plantas I. Nascimento, Clístenes Williams Araújo do, orient. II. Oliveira, Emídio Cantídio Almeida de, coorient. III. Biondi, Caroline Miranda, coorient. IV. Título

CDD 631.4

RITA DE CÁSSIA FERREIRA DA SILVA

**Teores de Fe, Mn, Zn e Cu em solos e cana-de-açúcar: reserva, disponibilidade e concentração na planta**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Agronomia – Ciências do Solo.

Defendida e aprovada em 28 de julho de 2017

---

Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento  
Orientador  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

**BANCA EXAMINADORA**

---

Dr. Fernando José Freire  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Dr. Ygor Jacques Agra Bezerra da Silva  
Universidade Federal Rural de Pernambuco



Aos meus pais

José Ferreira da Silva

Maria Delza da Silva Ferreira

Aos meus irmãos

José Júnior Ferreira (*In Memoriam*)

Jane Cleide Ferreira da Silva

Terezinha da Silva Ferreira

Maria José da Silva Ferreira

Maria do Socorro Ferreira da Silva

Francisco Ferreira da Silva

**Dedico**





## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus, por ser o criador do céu e da terra, por ter me dado forças para lutar por meus sonhos, pela capacitação, por estar sempre comigo.

Aos meus pais que são a razão da minha existência, por todo amor, dedicação, confiança, ensinamentos e apoio.

Aos meus irmãos por toda paciência, pelo amor, incentivo e apoio.

A Marcos Filho, pelo amor, apoio nas minhas decisões, pela paciência, por todo carinho e pelo incentivo.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência do solo da UFRPE por toda a estrutura oferecida;

Ao CNPq, órgão de fomento à pesquisa, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Clístenes Nascimento, pela orientação dedicada, apoio e confiança.

Aos professores Emídio Oliveira e Caroline Biondi por todo apoio.

À usina Japungu em nome do engenheiro agrônomo Dante e do técnico Roberto Carlos pela parceria em realizar o trabalho com grande apoio e dedicação.

À usina São José em nome do engenheiro agrônomo Antônio e do técnico Sandro pela parceria em realizar o trabalho com grande apoio e dedicação.

À usina Olho d'água em nome do engenheiro agrônomo Marcos Mendonça pela parceria em realizar o trabalho com grande apoio e dedicação.

À usina Trapiche em nome do engenheiro agrônomo Antônio Tabosa e do técnico Eduardo pela parceria em realizar o trabalho com grande apoio e dedicação.

Ao Grupo de Pesquisa em Química Ambiental de Solos pela recepção, apoio e amizade (Josângela, Simone, Bruno, Paula, Adriana, Ygor, Greiele, William, Sandra, Aline, Arthur, Luís, Frank, Rayanna e Silvinha).

Ao doutorando Fernando Bruno por me ajudar em todas as etapas da minha pesquisa, sempre com muita dedicação e paciência.

À Sandra e Aline por terem me ajudado em todas as análises sempre com muito empenho e dedicação.

Aos meus amigos Adriana Alves, Adriana Bezerra, Leandro Reis, Thaís Assunção, Evaniely, Greiele, Paula, Bruno por todo apoio, conselhos e amizade.

A todos os meus colegas da Pós- Graduação pelo apoio e carinho.

Ao prof. Fabio Freire de Oliveira por acreditar em mim e me dar todo incentivo e apoio para ir em busca dos meus sonhos.

À Marluce Andrade por ter me recebido em Recife e me dado todo apoio.

Aos funcionários na UFRPE, em especial a Maria do Socorro pela grande dedicação aos alunos do curso de pós-graduação em Ciência do solo desta instituição.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

## Teores de Fe, Mn, Zn e Cu em solos e cana-de-açúcar: reserva, disponibilidade e concentração na planta

### RESUMO

O potencial da adubação com micronutrientes na produtividade da cana-de-açúcar no Nordeste do Brasil pode estar subestimado devido aos poucos dados sobre os teores disponibilizados imediatamente às plantas e aqueles que podem ser disponibilizados a médio e longo prazos. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi determinar os teores disponíveis e de reserva e disponíveis de Fe, Mn, Zn e Cu em solos e o *status* nutricional de cana-de-açúcar em plantios em Pernambuco e na Paraíba. Foram amostrados 56 locais distribuídos em três contextos geológicos predominantes: bacia ígneo-sedimentar; sedimentos argilo-arenosos e complexo gnáissico-migmatítico, os quais foram selecionados em função da aplicação ou não de vinhaça e da variabilidade de solos (solos de várzeas, encostas e tabuleiros). Em cada local, foram retirados 10 amostras simples em duas profundidades (0,0-0,2 e 0,2-0,4 m) para formação de uma amostra composta por profundidade. Para amostragem das plantas, foi coletada a folha +3, em 10 plantas por área, para formar a amostra composta, em plantas no quinto mês de idade. Os micronutrientes no solo foram avaliados quanto à reserva potencial pelo método 3051a e quanto à disponibilidade pelo método Mehlich-1. Os teores de Fe, Mn, Zn e Cu foram determinados também nas folhas. Os resultados foram avaliados por estatística descritiva e multivariada. Em média, 70% dos solos apresentaram teores de Fe e Zn disponível acima de 30 mg kg<sup>-1</sup> e 1,5 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Os solos desenvolvidos no ambiente de sedimentos argilo-arenosos apresentaram baixa disponibilidade de Mn, com 67% das amostras apresentando concentrações inferiores a 6 mg kg<sup>-1</sup>. Exceto para os solos da bacia ígneo-sedimentar, baixa disponibilidade de Cu foi verificada nos solos estudados. Cerca de 50% das amostras apresentaram teores abaixo de 0,8 mg kg<sup>-1</sup> de Cu. Não foi identificada diferença significativa nos teores de micronutrientes entre os manejos de adubação (com e sem vinhaça). As plantas apresentaram teores adequados de Fe e Cu, enquanto os teores foliares de Mn e Zn foram abaixo do adequado. Manganês e Zn apresentaram os maiores potenciais de resposta à adubação. A maioria dos solos apresentou teores reserva de Fe, Mn, Zn e Cu menores do que os solos de referência na região de estudo, indicando redução desses micronutrientes nos solos cultivados com cana-de-açúcar. Na região estudada existe uma grande variação dos teores reserva dos micronutrientes no solo, principalmente de Mn.

**Palavras-chave:** Zinco. *Saccharum officinarum*. Manganês. Nutrição de plantas.



## Fe, Mn, Zn and Cu contents in soils and sugarcane: reserve, availability and concentration in the plant

### ABSTRACT

The potential of micronutrient fertilization for sugarcane in Northeast Brazil may be underestimated due to the limited data on the available and reserve concentrations of these elements in soils. In this context, the objective of this work was to determine the available and potentially available concentrations of Fe, Mn, Zn and Cu in soils and the nutritional status of sugarcane in plantations in Pernambuco and Paraíba states. We sampled 56 sites distributed in three predominant geological contexts: igneous-sedimentary basin; clay-sandy sediments and gnaissic-migmatitic complex. Samples were selected according to vinasse application (with and without) and soil variability. At each site, 10 single samples were taken at two depths (0.0-0.2 and 0.2-0.4 m) to form a sample composed of each depth. For plant sampling, leaf +3 was collected in 10 plants per area to form the composite sample, in plants at the fifth month of age. Soil micronutrients were evaluated for the potential reserve by the 3051a method and the availability by the Mehlich-1 method. The Fe, Mn, Zn and Cu contents were also determined in the leaves. The results were evaluated by descriptive and multivariate statistics. On average, 70% of the soils presented levels of Fe and Zn available above  $30 \text{ mg kg}^{-1}$  and  $1.5 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectively. Soils developed in the clay-sandy sediment environment had low Mn availability, with 67% of the samples presenting Mn concentrations below  $6 \text{ mg kg}^{-1}$ . Except for soils of the igneous-sedimentary basin, low Cu availability was verified in the studied soils. About 50% of the samples had levels below  $0.8 \text{ mg kg}^{-1}$  of Cu. No significant difference was identified in the micronutrients levels according to the management of fertilization (with and without vinasse). The plants presented adequate levels of Fe and Cu whereas the Mn and Zn leaf contents were below adequate. The Mn and Zn presented greater potential of response to the fertilization of sugarcane. Most of the soils presented lower Fe, Mn, Zn and Cu than the reference soils in the study region, indicating that there is a reduction of these micronutrients in soils cultivated with sugarcane. There is a great variation of the micronutrient reserve contents in the studied soils, mainly for Mn.

**Keywords:** Zinc. *Saccharum officinarum*. Manganese. Plant nutrition.



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - (A) Locais de amostragem das amostras de solos e plantas de cana-de-açúcar nos estados de Pernambuco e Paraíba em função do contexto geológico; (B) estratégia de amostragem para solo e planta em cada lote avaliado; (C) *status* fenotípico das plantas de cana-de-açúcar ao quinto mês de idade; (D) terço médio das folhas diagnoses +3 da cana-de-açúcar utilizadas para avaliação do *status* nutricional .....30
- Figura 2. Classificação textural dos solos cultivados com cana soca em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba quanto ao contexto geológico, nas profundidades de 0,0-0,2 (A-D) e 0,2-0,4 m (E-H) .....36
- Figura 3 - Teores médios ( $\pm$  erro padrão) reservas (A-B) e disponíveis (C-D) de Fe, Mn, Zn e Cu em solos cultivados com cana soca em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba quanto ao contexto geológico, nas profundidades de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m. Área 1 solos da bacia ígneo-sedimentar, Área 2 solos sob os sedimentos argilo-arenosos e Área 3 solos do complexo gnaíssico-migmatítico .....39
- Figura 4 - Teores médios ( $\pm$  erro padrão) reservas (A-B) e disponíveis (C-D) de Fe, Mn, Zn e Cu em solos cultivados com cana soca em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba quanto a classe textural, nas profundidades de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m.....40
- Figura 5 - Teores médios ( $\pm$  erro padrão) reservas (A-B) e disponíveis (C-D) de Fe, Mn, Zn e Cu em solos cultivados com cana soca em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba quanto ao manejo de adubação, nas profundidades de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m .....40
- Figura 6 - Frequência de distribuição dos teores disponíveis de Fe nos solos amostrados nas profundidades de 0,0-0,2 m (A, B e C) e 0,2-0,4 m (D, E e F) cultivados com cana-de-açúcar. A1 solos da região da bacia ígneo-sedimentar, A2 solos da região dos sedimentos argilo-arenosos e A3 solos da região do complexo gnaíssico-migmatítico. *Baixo*, *médio* e *alto*, são adaptações feitas por Pereira et al. (2001) .....42
- Figura 7 - Frequência de distribuição dos teores disponíveis de Mn nos solos amostrados nas profundidades de 0,0-0,2 m (A, B e C) e 0,2-0,4 m (D, E e F) cultivados com cana-de-açúcar. A1 solos da região da bacia ígneo-sedimentar, A2 solos da região dos sedimentos argilo-arenosos e A3 solos da região do complexo gnaíssico-migmatítico. *Baixo*, *médio* e *alto*, são adaptações feitas por Pereira et al. (2001) .....43
- Figura 8 - Frequência de distribuição dos teores disponíveis de Zn nos solos amostrados nas profundidades de 0,0-0,2 m (A, B e C) e 0,2-0,4 m (D, E e F) cultivados com cana-de-açúcar. A1 solos da região da bacia ígneo-sedimentar, A2 solos da região dos sedimentos argilo-arenosos e A3 solos da região do complexo gnaíssico-migmatítico. *Baixo*, *médio* e *alto*, são adaptações feitas por Pereira et al. (2001) .....44

Figura 9 - Frequência de distribuição dos teores disponíveis de Cu nos solos amostrados nas profundidades de 0,0-0,2 m (A, B e C) e 0,2-0,4 m (D, E e F) cultivados com cana-de-açúcar. A1 solos da região da bacia ígneo-sedimentar, A2 solos da região dos sedimentos argilo-arenosos e A3 solos da região do complexo gnaíssico-migmatítico. *Baixo*, *médio* e *alto*, são adaptações feitas por Pereira et al. (2001)  
.....45

Figura 10 - Círculos de correlação múltipla entre os teores disponíveis e reserva de Fe, Mn, Zn e Cu com algumas propriedades físicas e químicas dos solos cultivados com cana soca nos estados de Pernambuco e Paraíba, nas profundidades de 0,0-0,2 m (A) e 0,2-0,4 m (B). *MOS* matéria orgânica do solo, *CTC* capacidade de troca catiônica, índice *R* expressa teor reserva e índice *D* teor disponível  
.....49

Figura 11 - Teores médios ( $\pm$  erro padrão) de Fe, Mn, Zn e Cu na folha diagnose de cana soca, com cinco meses de idade, cultivadas em solos sobre diferente contexto geológico (A), diferente classe textural (B) e diferente manejo (C), nos estados de Pernambuco e Paraíba. *B/S* solos da bacia ígneo-sedimentar, *CGM* solos do complexo gnaíssico-migmatítico, *SAA* solos sobre os sedimentos argilo-arenosos, *FR-ARG* textura franco-argilosa, *FR* textura franca e *AR* textura arenosa  
.....51

Figura 12 - Correlações múltiplas entre os teores de Fe, Mn, Zn e Cu na folha diagnose de cana soca e nos solos cultivados em Pernambuco e Paraíba extraída pela análise de componentes principais. Índice *P* teor do micro na planta, índice *D* teor disponível no solo, índice *R* teor reserva no solo, *Fe/Mn<sub>s</sub>* relação entre os teores disponíveis destes elementos no solo, 1 profundidade 0,0-0,2 m e 2 profundidade 0,2-0,4 m  
.....55



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Identificação dos pontos amostrados de acordo com os municípios, as coordenadas, as ordens de solo e a geologia .....	31
Tabela 2 - Estatística descritiva dos atributos físicos e químicos de solos cultivados com cana soca em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba .....	35
Tabela 3 - Estatística descritiva dos teores reserva e disponíveis de micronutrientes em solos cultivados com cana soca em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba .....	38
Tabela 4 - Matriz da análise de componentes principais entre os teores disponíveis e reserva de Fe, Mn, Zn e Cu com outras propriedades físicas e químicas de solos cultivados com cana soca em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba, e, em diferentes profundidades .....	46
Tabela 5 - Estatística descritiva dos teores de micronutrientes na folha diagnose de cana soca, com cinco meses de idade, cultivada em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba .....	50
Tabela 6 - Matriz da análise de componentes principais entre os teores de Fe, Mn, Zn e Cu na folha diagnose de cana soca, com cinco meses de idade, e nos solos cultivados nos estados de Pernambuco e Paraíba .....	53



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	19
1.1 Hipóteses .....	20
1.2 Objetivo geral .....	20
1.3 Objetivos específicos.....	20
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	21
2.1 Cultivo da cana-de-açúcar no Brasil.....	21
2.2 Importância econômica da cana-de-açúcar no Brasil.....	21
2.3 Micronutrientes em cana-de-açúcar .....	22
2.4 Adubação com micronutrientes na cana-de-açúcar .....	22
2.5 Respostas da cana-de-açúcar à adubação com micronutrientes .....	23
2.6 Micronutrientes no solo .....	24
2.6.1 Reserva potencial de micronutrientes no solo .....	25
2.6.2 Disponibilidade .....	26
2.7 Interação entre nutrientes.....	27
2.8 Geologia e Litologia da Zona da Mata de Pernambuco e Paraíba .....	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 Locais de estudo e amostragens de solo e planta .....	29
3.2 Análises de solo e planta.....	32
3.3 Determinações dos micronutrientes e controle de qualidade .....	33
3.4 Análises estatísticas .....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	34
4.1 Propriedades físicas e químicas dos solos.....	34
4.2 Teores de micronutrientes reserva e disponível em função da geologia, classe textural e manejo .....	37
4.3 Teores de micronutrientes na planta e suas relações com teores reserva e disponíveis no solo .....	49
5 CONCLUSÕES .....	55



## 1 INTRODUÇÃO

O complexo sucroalcooleiro brasileiro é considerado o mais moderno e competitivo do mundo, mantendo o país entre os grandes produtores de açúcar e etanol. Sua expansão deu-se pela valorização do etanol como alternativa à substituição dos combustíveis fósseis, o fortalecimento do preço do açúcar no mercado de *commodities*, a utilização e valoração de subprodutos industriais resultantes do açúcar, álcool e a alcoolquímica, bem como pela tecnificação do sistema de produção (GOES; MARRA; SILVA, 2008).

A área destinada à atividade sucroalcooleira é de 9,8 milhões de hectares (12,9% de toda a área cultivada no Brasil) (IBGE, 2017). Embora o setor tenha se expandido no país, gerando impacto positivo na economia, a produtividade média da cana-de-açúcar é considerada baixa (em torno de 80 t ha<sup>-1</sup>), comparado ao potencial genético das variedades atuais, visto que há registros de produtividades superiores a 140 t ha<sup>-1</sup> (RIDESA, 2010). Na região Nordeste, esta produtividade média é ainda menor, em torno de 60 t ha<sup>-1</sup> (XAVIER et al., 2016).

O Nordeste está entre as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Brasil. Seu cultivo concentra-se principalmente na faixa litorânea dos estados de Alagoas, Pernambuco e Paraíba, em solos, em geral, bem intemperizados e de baixa fertilidade.

Na região, o manejo da adubação, de uma forma geral, restringe-se ao fornecimento de N, P e K e aplicação de resíduos industriais como vinhaça, naturalmente pobre em micronutrientes. Este fator, associado à baixa fertilidade dos solos e ao cultivo sucessivo com variedades de elevado poder de extração de nutrientes, pode vir a reduzir a disponibilidade dos nutrientes no solo, principalmente de micronutrientes, para os quais é negligenciada a fertilização com fontes primárias.

Nos últimos anos, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com foco na disponibilidade de micronutrientes em solos (VENDRAME et al., 2007) e na resposta da cana-de-açúcar à adubação (ADORNA; CRUSCIOL; ROSSATO, 2013; MADHURI et al., 2013; ARAIN et al., 2017). No Nordeste há uma carência de trabalhos sobre os teores de reserva e disponíveis de micronutrientes no solo e o *status* nutricional da cana-de-açúcar em relação a micronutrientes e possíveis respostas da cultura, tornando o levantamento desses dados essencial para o planejamento de práticas de

fertilização de solos e para a predição da resposta das culturas à aplicação de micronutrientes.

### **1.1 Hipóteses**

Os solos cultivados com cana-de-açúcar na região de estudo diferem com relação aos teores reserva e disponíveis de Fe, Mn, Zn e Cu sendo essas diferenças influenciadas pelo contexto geológico, pela variação textural e pelo manejo da adubação.

A cana-de-açúcar na região estudada apresenta deficiência de Fe, Mn, Zn e Cu, inclusive sem apresentação de sintomas visuais (“fome oculta”).

### **1.2 Objetivo geral**

Determinar os teores reserva e disponíveis de Fe, Mn, Zn e Cu em solos e o *status* nutricional de cana-de-açúcar em plantios nas Zonas da Mata Pernambucana e Paraibana, visando avaliar o potencial de fornecimento desses elementos a curto, médio e longo prazos e a possibilidade de resposta à adubação.

### **1.3 Objetivos específicos**

Avaliar o potencial de fornecimento de Fe, Mn, Zn e Cu em solos sob plantio de cana-de-açúcar a curto, médio e longo prazos.

Avaliar o *status* nutricional das plantas de cana em relação a Fe, Mn, Zn e Cu.

Identificar as principais características dos solos das Zonas da Mata Pernambucana e Paraibana que governam a disponibilidade dos micronutrientes.

Relacionar o contexto geológico com os teores de Fe, Mn, Zn e Cu nos solos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Cultivo da cana-de-açúcar no Brasil

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é originária do sudeste da Ásia. Introduzida no Brasil em meados do século XVI, seu cultivo mostrou-se promissor devido às condições edafoclimáticas favoráveis. Foi inicialmente estabelecida na região Nordeste e posteriormente o plantio foi expandido para a região Sudeste.

Atualmente, São Paulo lidera a produção de cana-de-açúcar, respondendo por 52% da área cultivada, seguido por Goiás (10,4%), Minas Gerais (10,1%) Mato Grosso do Sul (7%), Paraná (6%), Alagoas (3,7%), Pernambuco (3%) e Mato Grosso (2,7%). Estes oito estados são responsáveis por 94,9% da produção nacional. Os outros 14 estados produtores possuem áreas menores que 1% da área total do país, totalizando 5,1% da área total do país (CONAB, 2016).

Em São Paulo, a agroindústria açucareira tornou-se dinâmica devido ao uso de técnicas modernas de produção e proximidade a um complexo industrial que produz bens de capital, bem como importantes instituições de pesquisa, como o IAC (Instituto de Agronomia de Campinas) e Esalq (Faculdade de Agricultura de Luiz de Queiroz) (FURTADO; SCANDIFFIO; CORTEZ, 2011).

### 2.2 Importância econômica da cana-de-açúcar no Brasil

O Brasil lidera a produção mundial de cana-de-açúcar (33,9%), com 9,8 milhões de hectares destinados à atividade sucroalcooleira (12,9% de toda a área cultivada no Brasil) (IBGE, 2017). O cultivo tem gerado impacto positivo na economia, na safra de 2013/14 o setor contribuiu com cerca de US\$ 43,36 bilhões, equivalente a quase 2% do PIB nacional (NEVES; TROMBIN, 2014).

Em 2016, o país produziu 665,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, resultando em 33,49 milhões de toneladas de açúcar e 30,5 bilhões de litros de etanol total. A região Sudeste contribuiu com 73,5% do açúcar produzido no país. As regiões Centro-Oeste, Nordeste, Sul e Norte com 10,6%; 7,6%; 8,1% e 0,1%, respectivamente. A região Sudeste também é responsável pela maior produção do etanol (59,3%), seguida pelas regiões Centro-Oeste (29%), Nordeste (5,6%), Sul (5,2%) e Norte (0,9%) (CONAB, 2016).

### 2.3 Micronutrientes em cana-de-açúcar

Os micronutrientes desempenham funções vitais no metabolismo das plantas, como constituintes de grupos de enzimas (metaloproteínas), ativadores de reações enzimáticas, presença em grupos prostéticos que catalisam processos redox (Fe, Mn, Cu), formando complexos enzimáticos (Fe e Zn); e alguns micronutrientes (Mn, Zn, Cu) estão presentes nas isoenzimas superóxido dismutase, as quais agem como sistemas de varredura para erradicar radicais de oxigênio tóxicos de modo a proteger as biomembranas, o DNA, a clorofila e as proteínas (BROADLEY et al., 2012).

O fornecimento de micronutrientes em cada fase é fundamental para o desenvolvimento das plantas. Em cana-de-açúcar, as faixas consideradas adequadas dos teores foliares variam de: 80-150 mg kg<sup>-1</sup>, 50-125 mg kg<sup>-1</sup>, 25-30 mg kg<sup>-1</sup> e 8-10 mg kg<sup>-1</sup>, para Fe, Mn, Zn e Cu, respectivamente (MALAVOLTA, 1997). No entanto, ressalta-se que esses teores estão desatualizados e novos dados precisam ser produzidos devido as novas cultivares.

A exportação de micronutrientes na cultura varia entre as cultivares de cana-de-açúcar, conseqüentemente a exigência por esses elementos é também variada. Tasso Júnior et al. (2011) quantificaram o acúmulo de micronutrientes extraídos pelos colmos de cinco cultivares de ciclo precoce de cana-de-açúcar, as extrações médias (g por 100 t de colmo industrializável) variaram de 2692 a 4365; 1513 a 2900; 245 a 555 e 58 a 180 para Fe, Mn, Zn e Cu, respectivamente. A exportação desses elementos pelos colmos na cultura seguiu a seguinte ordem decrescente: Fe > Mn > Zn > Cu.

Em canaviais com produtividade superior a 75 t ha<sup>-1</sup> foram verificados teores médios de 74,4 mg kg<sup>-1</sup>, 14,3 mg kg<sup>-1</sup> e 5 mg kg<sup>-1</sup>, para Mn, Zn e Cu, respectivamente (REIS JR.; MONNERAT, 2002). Em geral, os elementos, Zn, Cu e B, têm sido apontados na literatura como os micronutrientes mais limitantes à cultura da cana-de-açúcar (REIS JR.; MONNERAT, 2002; PÍPERAS; CRESTE; ECHER, 2009; GUIMARÃES, 2014).

### 2.4 Adubação com micronutrientes na cana-de-açúcar

A utilização de micronutrientes no manejo de adubação das culturas no Brasil ainda é muito incipiente comparada aos macronutrientes. Os principais motivos que



despertaram o interesse pela utilização de fertilizantes que continham micronutrientes no Brasil foram: (a) o início da ocupação da região dos cerrados, formada por solos deficientes em micronutrientes; (b) o aumento da produtividade de inúmeras culturas com maior remoção e exportação de nutrientes; (c) a incorporação inadequada de calcário ou a utilização de doses elevadas, acelerando o aparecimento de deficiências induzidas; (d) o aumento de produção e de preferências de utilização de fertilizantes NPK de alta concentração, reduzindo o conteúdo incidental de micronutrientes nesses produtos, e (e) o aprimoramento das análises de solos e foliares como instrumentos de diagnose de deficiências de micronutrientes (ABREU; LOPES; SANTOS, 2007).

As faixas gerais consideradas adequadas dos teores de Fe, Mn, Zn e Cu no solo são de 31-45 mg dm<sup>-3</sup>, 9-12 mg dm<sup>-3</sup>, 1,6-2,2 mg dm<sup>-3</sup> e 1,3-1,8 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente (ALVAREZ et al., 1999). Em virtude das pequenas quantidades de micronutrientes requeridas pelas culturas, muitas vezes, as fontes indiretas, fornecem quantidades suficientes para o seu desenvolvimento (CARVALHO; NASCIMENTO; BIONDI, 2012). Na cultura da cana-de-açúcar, as entradas de micronutrientes, em geral, ocorrem de forma indireta, através da aplicação de corretivos, fertilizantes e resíduos industriais a exemplo da torta de filtro e vinhaça.

Em fertilizantes e corretivos comercializados no Nordeste brasileiro foram verificados as seguintes concentrações de Fe, Mn, Zn e Cu, 1552,8 mg kg<sup>-1</sup>; 100,2 mg kg<sup>-1</sup>; 38,60 mg kg<sup>-1</sup> e 222,7 mg kg<sup>-1</sup>, nos fertilizantes e 1606,3 mg kg<sup>-1</sup>; 70,9 mg kg<sup>-1</sup>; 9,55 mg kg<sup>-1</sup> e 8,3 mg kg<sup>-1</sup>, nos corretivos (CARVALHO; NASCIMENTO; BIONDI, 2012). Com relação à contribuição dos resíduos industriais utilizado no manejo da adubação, a torta de filtro se destaca como um produto que pode fornecer quantidades significativas de nutrientes, principalmente de Cu (ALMEIDA JÚNIOR et al., 2011).

## **2.5 Respostas da cana-de-açúcar à adubação com micronutrientes**

Trabalhos têm observado respostas satisfatórias da cana-de-açúcar quando adubada com Zn, Cu e B em solos de textura arenosa e de baixa fertilidade (BECARI, 2010; ADORNA; CRUSCIOL; ROSSATO, 2013; MADHURI et al., 2013).

Em estudo sobre respostas da cana planta à aplicação de micronutrientes em áreas de baixa fertilidade no estado de São Paulo, foi constatado aumento do perfilhamento da cana planta após aplicação de Zn, B e dose mista contendo NPK+S + Zn+Mn + Cu+B e Mo. Em relação à produtividade, respostas foram observadas para

Mn, Zn, Cu e Mo. Entre os micronutrientes avaliados, o Zn proporcionou os maiores ganhos de produção, cerca de 20 t ha<sup>-1</sup>, em média (BECARI, 2010).

Ao estudarem os efeitos de doses de adubação com Zn (1, 2, 3 e 4 kg ha<sup>-1</sup>), Farias et al. (2009) não verificaram influência das doses sobre nenhum índice de qualidade industrial. Doses maiores de Zn (4,4; 8,9; 17,9 e 33,8 kg ha<sup>-1</sup>) foram avaliados por Wang et al. (2005) em solos da Louisiana, EUA; esses autores relataram aumento médio acima de 23% na produtividade de cana-de-açúcar para as doses de 4,4 e 8,9 kg ha<sup>-1</sup>, e, quando submetidas a doses superiores (17,9 e 33,8 kg ha<sup>-1</sup>), verificou-se queda no rendimento da cultura, indicando toxicidade.

O fornecimento de 5 até 15 kg ha<sup>-1</sup> de Zn em soqueiras de cana-de-açúcar foi eficiente para incrementar os teores do elemento no solo (0,6 até 1,2 mg dm<sup>-3</sup>) e na folha (9,8 até 25 mg kg<sup>-1</sup>), entretanto, não afetou o crescimento e a produtividade de colmos da cultura (COSTA FILHO; PRADO, 2008). Os autores citam algumas hipóteses que podem contribuir para a ausência da resposta, como a ciclagem constante dos micronutrientes no sistema de produção com a queima; as cinzas conteriam uma concentração significativa de Zn que retornaria ao solo.

Benett et al. (2011) avaliaram o efeito das doses de Mn (2,5; 5,0; 7,5; e 10,0 kg ha<sup>-1</sup>) e verificaram que as aplicações aumentaram o número de internódios e o diâmetro de colmo na cana planta até as doses de 6,9 e 6,6 kg ha<sup>-1</sup> de Mn, respectivamente, mas não influenciaram a produtividade de colmos.

Na Índia, Madhuri et al. (2013) avaliaram a resposta da cana-de-açúcar à aplicação de micronutrientes em solo arenoso e observaram que a aplicação de Zn e Fe proporcionou aumentos significativos na produção, comprimento e diâmetro da cana. Aumentos significativos na produtividade de colmos e açúcar na cana planta com aplicação de Zn e B, foi verificado também por Adorna, Crusciol e Rossato (2013), em solos de textura arenosa.

## 2.6 Micronutrientes no solo

As concentrações dos micronutrientes no solo podem ser divididas em “total” e “disponível”. As concentrações totais incluem todas as formas dos micronutrientes em um solo, como os íons ligados na estrutura cristalina dos minerais primários e secundários; os adsorvidos nas superfícies de minerais secundários, como argilas, óxidos e carbonatos, ligados em matéria orgânica de estado sólido e íons livres e

complexos orgânicos e inorgânicos solúveis na solução do solo (ALLOWAY, 2013). A concentração "disponível" de um micronutriente no solo é uma estimativa da fração desse elemento que está presentes como íons livres, complexos solúveis ou em formas trocáveis (ALLOWAY, 2013).

### **2.6.1 Reserva potencial de micronutrientes no solo**

A reserva de micronutriente refere-se ao teor "total" ou "pseudo total" determinado nos solos. As concentrações "totais" são determinadas por método químico envolvendo digestão em ácido nítrico concentrado ( $\text{HNO}_3$ ) e ácido fluorídrico (HF), que dissolvem todos os constituintes do solo e fornecem uma concentração total "verdadeira". Outro procedimento analítico envolve a digestão utilizando  $\text{HNO}_3$  e HCl concentrados os quais dissolvem a maioria dos constituintes do solo, exceto os que estão fortemente ligados em minerais de silicato. Este é referido como o conteúdo "pseudo-total" ou "ambientalmente disponível". Embora não forneça concentrações totais absolutas, este método extrai todos os micronutrientes que provavelmente se tornarão disponível a médio e longo prazo (ALLOWAY, 2013).

O conhecimento dos teores reserva, embora não indique a disponibilidade imediata dos micronutrientes, auxilia a caracterizar a potencialidade do solo em suprir os elementos essenciais para as culturas, a médio e longo prazos, e também seu potencial para deficiência ou toxicidade. Os teores naturais de elementos no solo são dependentes de características específicas para cada ambiente, como a composição do material de origem, os processos pedogenéticos envolvidos e o grau de desenvolvimento dos solos (BIONDI et al., 2011).

A relativa resistência ao intemperismo de várias rochas e minerais aparentemente tem grande influência tanto na textura como no teor de micronutrientes dos solos. Solos de textura mais argilosa são provavelmente derivados dos minerais mais facilmente intemperizados, que são também a principal fonte de micronutrientes. Os solos mais arenosos são derivados de minerais, tais como o quartzo, que são resistentes ao intemperismo e têm baixo conteúdo dos micronutrientes (SILLANPÄÄ, 1972).

Em solos da Louisiana, as diferenças de grau de evolução e material de origem do solo foram os principais fatores responsáveis pelas grandes diferenças no teor de reserva de Cu. Teores de Cu mais altos foram verificados em solos com textura

argilosa. Os solos mais arenosos continham quantidades menores de Cu, principalmente nas áreas da planície costeira, com solo mais intemperizado (KARIN; SEDBERRY JR; MILLER, 1976). Na Índia, os maiores teores reserva de Fe, Mn, Zn e Cu correlacionaram positivamente com os maiores teores de argila (KATYAL; SHARMA, 1991).

No estado de Pernambuco, a reserva natural de Fe, Mn, Zn, e Cu nos solos é inferior aos de solos de outras regiões do país. Entre os micronutrientes avaliados, o Cu apresentou as menores concentrações. Em 50 % dos solos, os teores de Cu estiveram inferiores a  $3 \text{ mg kg}^{-1}$ , indicando baixo potencial dos solos em suprir este micronutrientes para plantas (BIONDI et al., 2011).

### **2.6.2 Disponibilidade**

Os micronutrientes são absorvidos pelas plantas principalmente nas formas iônicas  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$  e  $\text{HMoO}^{4-}$  ou  $\text{MoO}_4^{2-}$ , com exceção do B, cuja principal forma absorvida é a forma neutra do ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) (MARSCHNER, 2012). Estas formas estão em equilíbrio com outras formas destes elementos na fase sólida do solo (minerais silicatados, óxidos e matéria orgânica).

A disponibilidade dos micronutrientes é governada pelos atributos físicos, químicos e mineralógicos dos solos, tais como pH, teor e tipo de argila, capacidade de troca catiônica e teor de matéria orgânica. Estes atributos influenciam as reações de adsorção/dessorção, precipitação/dissolução, complexação e oxiredução que, em conjunto, determinam a forma de ocorrência dos elementos (KABATA-PENDIAS, 2001).

Estudos evidenciam que o pH do solo é provavelmente o fator que mais influencia a disponibilidade dos micronutrientes para as plantas (DYNIA; BARBOSA FILHO, 1993; MARTÍNEZ; MOTTO, 1999; BORGES; COUTINHO, 2004; ARIAS et al., 2005). Em geral, a disponibilidade de Fe, Mn, Zn, Cu e B diminuem, e a de Mo aumenta, à medida que pH do solo se eleva (ABREU; LOPES; SANTOS, 2007).

A maioria dos solos brasileiros são ácidos e a calagem é a prática mais comum e efetiva para reduzir os problemas relacionados à acidez do solo (FAGERIA; BALIGAR, 2001). A incorporação inadequada do calcário ou utilização de doses elevadas pode acelerar a deficiência de micronutrientes. A aplicação de calcário em amostras de solo resultou na redistribuição de Zn para formas menos disponíveis

(matéria orgânica e óxidos). A concentração média reduziu de 2,7 para 0,1 mg kg<sup>-1</sup> (NASCIMENTO et al., 2007). Em solo arenoso, a correção do pH reduziu os teores trocáveis de Fe, Mn e Zn (SHUMAN, 1986).

A matéria orgânica, depois do pH, parece ser o fator mais importante que controla a solubilidade de micronutrientes no solo (MOUTA; SOARES; CASAGRANDE, 2008). Nos solos de referência de Pernambuco, a matéria orgânica foi uma das principais responsáveis pela retenção e disponibilidade de Zn, Cu e Mn, como também, para os teores disponíveis de Fe (NASCIMENTO et al., 2006; OLIVEIRA; NASCIMENTO, 2006). Em solos com 18 anos de cultivo na China, a matéria orgânica foi responsável pela maior disponibilidade de Fe, Mn e Zn (WEI et al., 2006), como também para Cu em solos de terra arqueológica (MESCOUTO et al., 2011). Katyal e Sharma (1991) correlacionaram as propriedades do solo com a distribuição de Fe, Mn, Zn e Cu em solos de referência na Índia e verificaram que a disponibilidade desses elementos diminuiu com o aumento do pH e com a redução nos teores de matéria orgânica e argila.

## **2.7 Interação entre nutrientes**

A carência de micronutrientes em plantas pode ocorrer pela falta do micronutriente em quantidade suficiente, de modo que a planta não consegue suprir suas demandas, por não se encontrarem no solo na forma disponível para as plantas ou por estarem retidos em algum componente do solo ou indisponível pela presença de outros elementos, caracterizando a deficiência induzida (DECHEN; NACHTIGALL, 2006). A última ocorre pela interação entre elementos no solo ou da planta.

Essas interações entre nutrientes em plantas ocorrem quando o suprimento de um nutriente afeta a absorção, distribuição ou função de outro nutriente. Assim, dependendo do suprimento de nutrientes, as interações podem induzir deficiências ou toxicidades e podem modificar a resposta do crescimento (ROBSON; PITMAN, 1983).

As interações podem ser classificadas em duas categorias principais: (1) interações entre íons, que ocorrem devido à capacidade de formarem ligações químicas (iônica ou covalente). Essa forma de interação é geralmente mais marcada entre íons com propriedades químicas muito diferentes. Neste tipo, ocorre a formação de precipitados ou complexos; (2) A segunda forma de interação é entre íons com propriedades químicas suficientemente semelhantes para competir por sítios de adsorção (em minerais e óxidos de argila no solo e nas paredes celulares das plantas),

absorção, transporte (dentro do xilema e do floema) e função (em sítios ativos). Para essas interações, a concorrência será maior para elementos com raio, carga, geometria de coordenação e configuração eletrônica semelhante (ROBSON; PITMAN, 1983).

As interações nutricionais podem ser positivas, negativas ou ausentes. Quando os nutrientes em combinação resultam em uma resposta de crescimento maior que a soma de seus efeitos individuais, a interação é positiva. Quando o efeito combinado é menor, a interação é negativa. No primeiro caso, os nutrientes são sinérgicos, enquanto que no último eles são antagônicos. Se não houver desvio de resposta aditiva de dois nutrientes quando aplicado separadamente, há ausência de interação (FAGERIA, 2001). As relações mais importantes envolvendo os micronutrientes são: interações antagônicas entre os macronutrientes P, Ca e Mg com Fe, Mn, Zn e Cu; e entre os micronutrientes, Cu com Fe, Mn e Zn; Fe com Mn e Cu; Mn com Fe e Zn (MALAVOLTA, 1997).

## **2.8 Geologia e Litologia da Zona da Mata de Pernambuco e Paraíba**

A Zona da Mata de Pernambuco é dividida nas zonas Norte e Sul, as quais diferem quanto a geologia e litologia. A Mata Sul é caracterizada pela geologia mais diversificada, composta por granitos e uma variedade de rochas vulcânicas, incluindo o basalto, andesita, traquitos e riolitos (LONG et al., 1986), enquanto que na Mata Norte a geologia é mais uniforme e composta, de forma geral, por sedimentos argilo-arenosos. A Mata Sul da Paraíba, onde se concentra o cultivo de cana-de-açúcar, apresenta de forma geral geologia semelhante a Mata Norte de Pernambuco, ambas incluídas no Grupo Barreiras, constituído por sedimentos areno-argilosos não consolidados de origem continental (CPRM, 2002).

Na Zona da Mata Sul de Pernambuco, devido ao intemperismo químico mais intenso, destacam-se solos bem desenvolvidos, principalmente das classes Latossolos amarelos, Argissolos amarelos, Argissolos vermelho-amarelos e, raramente, Argissolos vermelhos. Em menor proporção, onde ocorrem rochas vulcânicas básicas, encontram-se Nitossolos vermelhos. Estes solos apresentam fertilidade natural muito baixa, sendo esta pobreza química dos solos consequência da natureza do material de origem e das condições climáticas vigentes, proporcionando a formação de solos caulíníticos (CPRM, 2014).

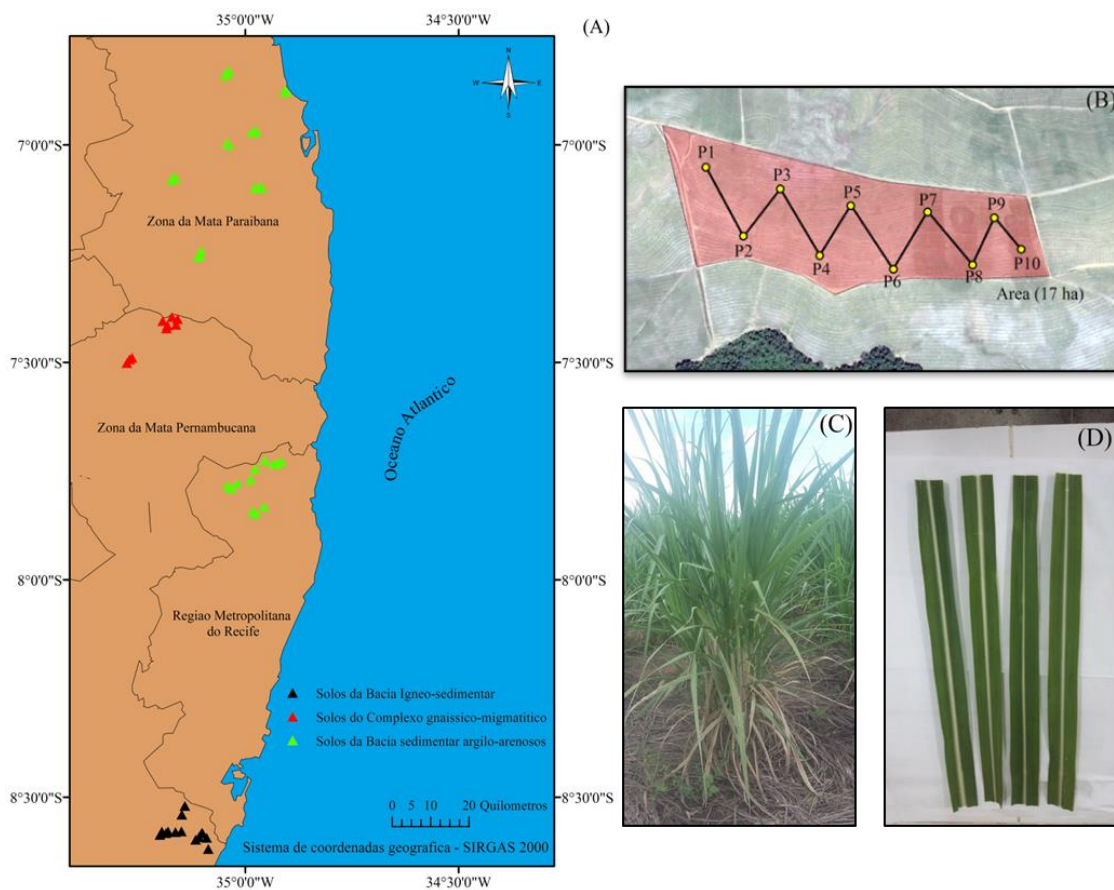
Os solos desenvolvidos no Grupo Barreiras (Mata Norte de Pernambuco e Mata

Sul da Paraíba) de maior ocorrência são Argissolos amarelos e Latossolos amarelos; outros solos de pouca expressão, em termos de área, são os Espodossolos e os Argissolos acinzentados (CPRM, 2014).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Locais de estudo e amostragens de solo e planta**

O estudo foi realizado nos estados de Pernambuco e Paraíba, em três contextos geológicos representativos na região canavieira estudada: bacia ígneo-sedimentar, sedimentos argilo-arenosos e complexo gnaíssico-migmatítico (Figura 1). Estas regiões apresentam clima do tipo Ams segundo classificação Köppen-Geiger, clima tropical úmido com médias pluviométricas anuais entre 1.000 e 2.200 mm e temperatura média de 25°C. O plantio da cana-de-açúcar ocorre principalmente nos meses de maio a agosto e a colheita inicia no mês de setembro e se estende até março. Foram coletados 56 locais distribuídos nos dois estados: bacia ígneo-sedimentar (14 locais), sedimentos argilo-arenosos (30 locais) e complexo gnaíssico-migmatítico (12 locais), selecionados em função da aplicação ou não de vinhaça e da variabilidade de solos (solos de várzea, encosta e tabuleiro), todos sob de cultivo de cana “soca” e isentos de irrigação plena (Tabela 1). Os locais de coleta foram georreferenciados por meio de GPS.



**Figura 1.** (A) Locais de amostragem das amostras de solos e plantas de cana-de-açúcar nos estados de Pernambuco e Paraíba em função do contexto geológico; (B) estratégia de amostragem para solo e planta em cada lote avaliado; (C) status fenotípico das plantas de cana-de-açúcar ao quinto mês de idade; (D) terço médio das folhas diagnoses +3 da cana-de-açúcar utilizadas para avaliação do status nutricional.



**Tabela 1.** Identificação dos pontos amostrados de acordo com os municípios, as coordenadas, as ordens de solo e a geologia

Solos	Municípios	Coordenadas (Lat/Long)	Ordem de solo <sup>(a)</sup>	Geologia <sup>(b)</sup>
<b>Paraíba</b>				
1	Rio Tinto	-6,8303/-35,0378	Argissolo	Sedimento aluvionar, sedimento detrito-laterítico
2	Rio Tinto	-6,8344/-35,0432	Argissolo	Sedimento aluvionar, sedimento detrito-laterítico
3	Rio Tinto	-6,8399/-35,0477	Argissolo	Sedimento aluvionar, sedimento detrito-laterítico
4	Lucena	-6,8758/-34,9075	Argissolo	Calcarenito, calcário, fosforito
5	Lucena	-6,8764/-34,9045	Argissolo	Sedimento aluvionar, sedimento detrito-laterítico
6	Lucena	-6,8782/-34,9026	Argissolo	Sedimento aluvionar, sedimento detrito-laterítico
7	Santa Rita	-6,9684/-34,9740	Argissolo	Arenito, arenito conglomerático, argilito arenoso
8	Santa Rita	-6,9704/-34,9761	Argissolo	Arenito, arenito conglomerático, argilito arenoso
9	Santa Rita	-6,9713/-34,9847	Argissolo	Areia, argila, cascalho
10	Santa Rita	-6,9963/-35,0418	Argissolo	Arenito, arenito conglomerático, argilito arenoso
11	Santa Rita	-6,9976/-35,0390	Argissolo	Arenito, arenito conglomerático, argilito arenoso
12	Santa Rita	-6,9993/-35,0384	Argissolo	Areia, argila, cascalho
13	Santa Rita	-7,0978/-34,9613	Neossolo	Sedimento aluvionar, sedimento detrito-laterítico
14	Santa Rita	-7,0996/-34,9673	Neossolo	Sedimento aluvionar, sedimento detrito-laterítico
15	Santa Rita	-7,0983/-34,9774	Neossolo	Sedimento aluvionar, sedimento detrito-laterítico
16	Sapé	-7,0753/-35,1638	Argissolo	Arenito, arenito conglomerático, argilito arenoso
17	Sapé	-7,0774/-35,1705	Argissolo	Areia, argila, cascalho
18	Sapé	-7,0808/-35,1723	Argissolo	Arenito, arenito conglomerático, argilito arenoso
19	Pedras de Fogo	-7,2436/-35,1036	Argissolo	Arenito, arenito conglomerático, argilito arenoso
20	Pedras de Fogo	-7,2553/-35,1065	Argissolo	Arenito, arenito conglomerático, argilito arenoso
21	Pedras de Fogo	-7,2578/-35,1104	Argissolo	Arenito, arenito conglomerático, argilito arenoso
<b>Pernambuco</b>				
22	Itambé	-7,3959/-35,1715	Argissolo	Ortognaíse granítico a tonalítico
23	Itambé	-7,4006/-35,1584	Argissolo	Ortognaíse granítico a tonalítico
24	Itambé	-7,4049/-35,1933	Argissolo	Ortognaíse granítico a tonalítico
25	Itambé	-7,4138/-35,1622	Argissolo	Ortognaíse granítico a tonalítico
26	Itambé	-7,4153/-35,1824	Argissolo	Ortognaíse granítico a tonalítico
27	Itambé	-7,4221/-35,1842	Argissolo	Ortognaíse granítico a tonalítico
28	Ferreiros	-7,4896/-35,2652	Luvissolo	Ortognaíse granítico a tonalítico
29	Ferreiros	-7,4931/-35,2711	Luvissolo	Ortognaíse granítico a tonalítico
30	Timbaúba	-7,5014/-35,2772	Luvissolo	Ortognaíse granítico a tonalítico
31	Itapissuma	-7,7281/-34,9151	Argissolo	Arenitos, siltitos e lateríticos
32	Itapissuma	-7,7333/-34,9247	Argissolo	Arenitos, siltitos e lateríticos
33	Itapissuma	-7,7339/-34,9330	Argissolo	Arenitos, siltitos e lateríticos
34	Igarassu	-7,7261/-34,9537	Argissolo	Arenitos, siltitos e lateríticos
35	Igarassu	-7,7451/-34,9772	Argissolo	Arenitos, siltitos e lateríticos
36	Igarassu	-7,7700/-34,9877	Argissolo	Arenitos, siltitos e lateríticos
37	Igarassu	-7,7784/-35,0183	Espodossolo	Arenitos, siltitos e lateríticos
38	Igarassu	-7,7901/-35,0329	Espodossolo	Arenitos, siltitos e lateríticos
39	Igarassu	-7,8323/-34,9559	Latossolo	Arenitos, siltitos e lateríticos
40	Igarassu	-7,8428/-34,9820	Latossolo	Arenitos, siltitos e lateríticos
41	Igarassu	-7,8483/-34,9748	Latossolo	Arenitos, siltitos e lateríticos
42	Araçoiaba	-7,7836/-35,0419	Argissolo	Arenitos, siltitos e lateríticos
43	Sirinhaém	-8,5201/-35,1414	Argissolo	Monzonitos e granodioritos
44	Sirinhaém	-8,5403/-35,1485	Argissolo	Biotita gnaisses quartzofeldspáricos
45	Sirinhaém	-8,5788/-35,1494	Argissolo	Biotita-anfibólio granitóides
46	Sirinhaém	-8,5804/-35,1634	Argissolo	Biotita-anfibólio granitóides
47	Sirinhaém	-8,5790/-35,1809	Argissolo	Biotita-anfibólio granitóides
48	Sirinhaém	-8,5827/-35,1857	Gleissolo	Biotita-anfibólio granitóides
49	Sirinhaém	-8,5791/-35,1952	Latossolo	Biotita-anfibólio granitóides
50	Sirinhaém	-8,5868/-35,1996	Gleissolo	Biotita-anfibólio granitóides
51	Sirinhaém	-8,5826/-35,1021	Gleissolo	Conglomerados polimodais oligomíticos
52	Sirinhaém	-8,5830/-35,1002	Argissolo	Conglomerados polimodais oligomíticos
53	Sirinhaém	-8,5918/-35,1085	Argissolo	Sedimentos silte-argilosos
54	Sirinhaém	-8,5935/-35,0904	Argissolo	Sedimentos silte-argilosos
55	Sirinhaém	-8,5977/-35,1161	Argissolo	Sedimentos silte-argilosos
56	Sirinhaém	-8,6193/-35,0866	Argissolo	Conglomerados polimodais oligomíticos

(a) Embrapa (2000) e (b) CPRM (2202a, 2006b)

Em cada área foram retirados 10 subamostras de solo na profundidade de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m e formado uma amostra composta, utilizando trado tipo holandês de aço inoxidável (Figura 1-B). O solo foi seco em temperatura ambiente, destorroado e passado em peneira de aço inoxidável (< 2 mm).

Para amostragem da planta, foi coletada a folha +3, em 10 plantas por área, para formar a amostra composta, em plantas no quinto mês de idade (Figura 1-C). Para análise, foi retirado o terço médio da folha (Figura 1-D), excluindo a nervura central. A folha foi lavada em água corrente e água destilada e seca em estufa a 65 °C até obter peso constante, com posterior trituração em moinho tipo Wiley.

### 3.2 Análises de solo e planta

Nos solos foram analisados para pH em água; carbono orgânico do solo (COS) pelo método Walkley-Black modificado; posteriormente estimou-se o teor da matéria orgânica do solo utilizando o fator de conversão 2 (PRIBYL, 2010); a capacidade de troca catiônica [ $T = Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + (H^+ + Al^{3+})$ ] e o teor de areia, silte e argila pelo método da pipeta. Todo o procedimento analítico seguiu as normas preconizadas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2011).

Os teores disponíveis de Fe, Mn, Zn e Cu foram extraídos por Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup>) na relação solo:solução de 1:5 (EMBRAPA, 2011). As amostras foram agitadas por 5 minutos e o sobrenadante filtrado e armazenado a 4°C para análise.

Para extração dos teores reserva no solo de Fe, Mn, Zn e Cu, subamostras de TFSA foram maceradas em almofariz de ágata e passado em peneira de (< 0,15 mm) de aço inoxidável. Transferiu-se 1,0 g de solo para tubos de teflon e adicionados 9 mL de HNO<sub>3</sub> e 3 mL de HCl (USEPA, 1998). As amostras foram mantidas em forno micro-ondas (Ethos Easy), por 4'30" a 175°C". Após resfriamento, transferidas para balões certificados (NBR ISSO/IEC) de 25 mL, o volume completado com água destilada e os extratos filtrados em papel quantitativo faixa azul n° 42.

Os teores de Fe, Mn, Zn e Cu nas amostras vegetais foram extraídos por meio da digestão de 0,500 g do material triturado em forno micro-ondas juntamente com 9 mL de HNO<sub>3</sub> e 3 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, na temperatura de 180°C por 10' de acordo com a metodologia USEPA 3050b (1996). Os extratos foram filtrados, o volume aferido para balões certificados de 25 mL e armazenados a 4°C para análise. Todas as análises

foram realizadas em duplicatas.

### **3.3 Determinações dos micronutrientes e controle de qualidade**

Os teores de Fe, Mn, Zn e Cu nos extratos de solo e planta foram determinados em espectroscopia de emissão ótica com plasma acoplado (ICP-OES/ Optima 7000 Perkin Elmer).

O controle de qualidade das análises foi realizado utilizando amostra de solo e planta com valores certificados para metais. O solo certificado foi o SRM 2709 *San Joaquin Soil (Baseline Trace Element Concentrations)* e a planta certificada foi 1570a (*Trace Element in Spinach*). Ambos, certificado pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST).

As curvas de calibração para determinação dos micronutrientes foram preparadas a partir de padrões de 1000 mg L<sup>-1</sup> (TITRISOL®, Merck) utilizando água ultra pura para diluição. Para limpeza e descontaminação das vidrarias, as mesmas foram mantidas em solução de ácido nítrico a 5% por 24 horas e enxaguadas com água destilada.

As recuperações Fe, Mn, Zn e Cu variaram de 70–108% para a amostra SRM 1570a e de 68–98% para SRM 2709. Todas as análises foram realizadas em duplicatas.

### **3.4 Análises estatísticas**

Os dados foram submetidos à estatística descritiva (média, mediana, mínimo, máximo, desvio padrão, coeficiente de variação distribuição de frequência) e multivariada (análise de componentes principais, ACP), com o intuito de relacionar os teores de na planta e disponíveis no solo com os teores reserva e as propriedades físicas e químicas dos solos. Todo o procedimento estatístico foi realizado usando o software STATISTICA (versão 10).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Propriedades físicas e químicas dos solos

Os valores de pH variaram de 4,3 a 6,6 e a maioria das amostras apresentaram um pH ácido (igual a 5,5), típico de solos tropicais. Os teores de matéria orgânica variaram de 8 g kg<sup>-1</sup> a 68 g kg<sup>-1</sup>, com média de 25 g kg<sup>-1</sup>. A capacidade de troca catiônica variou de 3,4 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> a 21,5 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, com média de 8,3 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>.

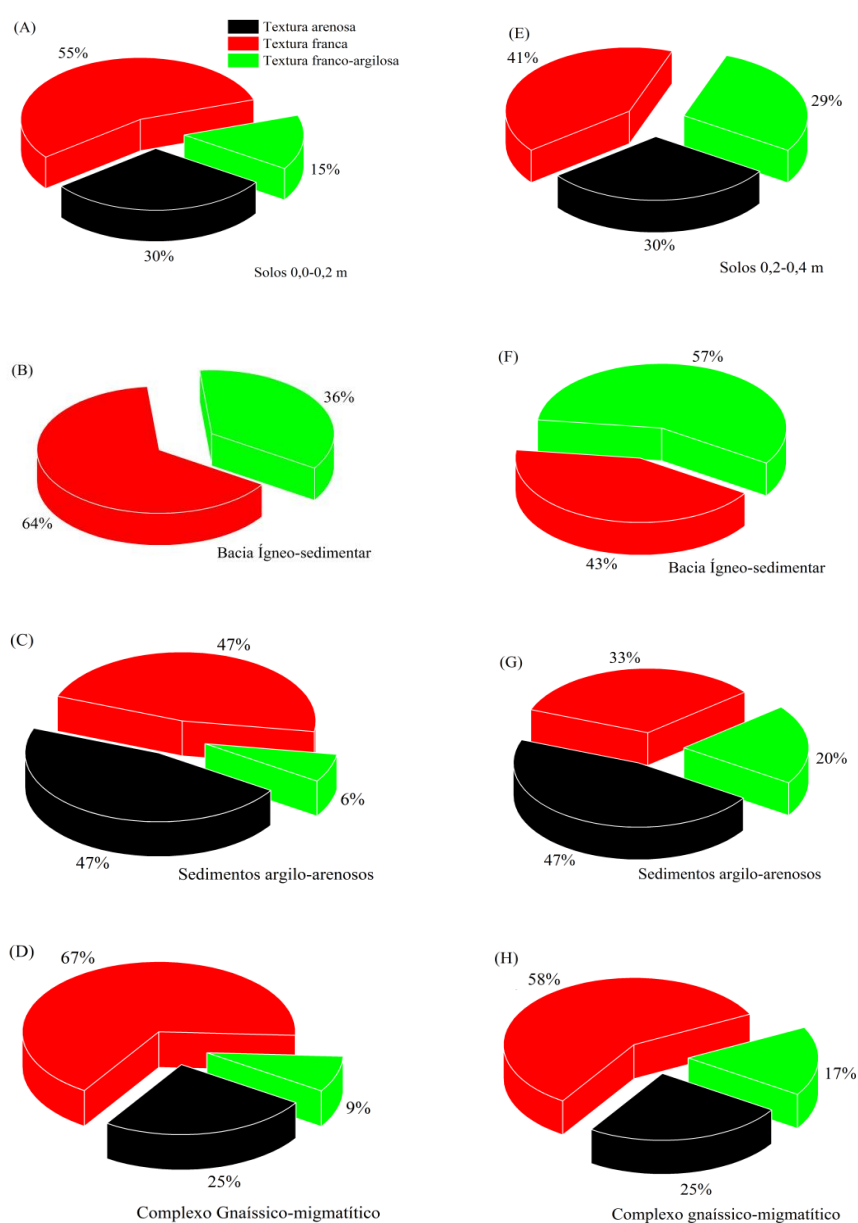
Os maiores teores de matéria orgânica (34 g kg<sup>-1</sup>), capacidade de troca catiônica (10,8 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e argila (> 300 g kg<sup>-1</sup>) foram observados nos solos da bacia ígneo-sedimentar. Com exceção da saturação por bases, as características químicas dos solos desenvolvidos no ambiente de sedimentos argilo-arenosos e no ambiente complexo gnaíssico-migmatítico foram similares (Tabela 2).

**Tabela 2.** Estatística descritiva dos atributos físicos e químicos de solos cultivados com cana soca em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba

<b>Bacia ígnea-sedimentar</b>								
<b>0,0-0,2 m</b>								
	pH	V	H+Al	T	MOS	Areia	Silte	Argila
	H <sub>2</sub> O	%	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	-----	-----	-----g kg <sup>-1</sup> -----	-----	-----
Média	5,5	56,0	4,4	10,2	34,4	401,6	281,1	317,3
Mínimo	4,3	25,5	1,5	6,8	16,5	138,6	80,7	161,4
Máximo	6,1	79,9	9,3	14,4	63,8	757,9	491,8	450,4
DP (±)	0,5	15,5	1,9	2,5	12,9	188,3	146,8	93,1
CV (%)	9,9	27,7	42,7	24,2	37,5	46,9	52,2	29,3
<b>0,2-0,4 m</b>								
Média	5,8	51,6	3,9	8,3	25,2	360,7	280,0	359,3
Mínimo	4,4	31,3	2,2	5,7	16,6	155,1	97,8	144,0
Máximo	6,5	79,2	6,9	11,6	36,7	732,7	489,2	567,8
DP (±)	0,6	14,9	1,3	1,8	7,1	180,6	134,4	117,1
CV (%)	10,6	28,9	32,2	22,0	28,0	50,1	48,0	32,6
<b>Sedimentos argilo-arenosos</b>								
<b>0,0-0,2 m</b>								
Média	5,4	53,4	3,2	7,5	21,9	754,5	90,0	155,4
Mínimo	4,5	18,9	0,8	3,4	11,2	327,4	8,0	24,3
Máximo	6,6	87,1	12,8	21,5	68,1	966,0	385,1	435,1
DP (±)	0,6	19,3	2,3	4,6	11,7	180,2	94,0	109,7
CV (%)	10,4	36,1	71,8	61,5	53,3	23,9	104,3	70,6
<b>0,2-0,4 m</b>								
Média	5,4	47,3	3,0	7,4	17,0	707,9	93,3	198,9
Mínimo	3,4	15,9	0,9	2,3	5,5	163,0	0,0	8,0
Máximo	6,5	90,6	11,2	29,2	54,3	952,1	414,8	495,5
DP (±)	0,7	22,4	2,2	7,5	10,7	217,0	103,0	142,6
CV (%)	13,4	47,4	75,3	101,3	62,5	30,7	110,5	71,7
<b>Complexo gnaíssico-migmatítico</b>								
<b>0,0-0,2 m</b>								
Média	5,5	62,1	3,3	8,4	22,4	725,7	99,3	175,0
Mínimo	4,7	31,5	1,1	3,4	7,9	512,2	20,2	19,9
Máximo	6,3	83,3	7,1	13,9	43,6	940,4	267,7	421,3
DP (±)	0,5	13,4	1,9	3,3	11,8	141,2	75,9	131,6
CV (%)	9,3	21,6	58,6	39,4	52,6	19,5	76,4	75,2
<b>0,2-0,4 m</b>								
Média	5,4	60,0	3,3	8,3	20,1	720,7	91,3	188,0
Mínimo	4,7	25,0	1,3	3,1	7,9	474,3	9,0	21,3
Máximo	6,1	82,5	7,4	15,2	42,7	936,2	214,9	460,0
DP (±)	0,4	16,0	2,1	3,6	11,4	149,0	71,5	140,2
CV (%)	7,6	26,7	64,6	43,4	56,9	20,7	78,3	74,6

*V* saturação por bases, *MOS* matéria orgânica do solo, *T* capacidade de troca catiônica, *DP* desvio padrão e *CV* coeficiente de variação

Mais de 50% dos solos cultivados com cana-de-açúcar na região de estudo são de textura média (Figura 2-A). Com relação aos diferentes contextos geológicos, os solos desenvolvidos no ambiente da bacia ígneo-sedimentar e no complexo gnaíssico-migmatítico predominou a textura média (>60% dos solos) (Figura 2 B-D). No ambiente de sedimentos argilo-arenosos, foi constatada a predominância de solos de textura arenosa (46% dos solos) e de textura média (46% dos solos) (Figura 2-C). A predominância da mesma classe textural se repetiu também na camada 0,2-0,4 m, para os dois últimos contextos.



**Figura 2.** Classificação textural dos solos cultivados com cana soca em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba quanto ao contexto geológico, nas profundidades de 0,0-0,2 (A-D) e 0,2-0,4 m (E-H)

#### **4.2 Teores de micronutrientes reserva e disponível em função da geologia, classe textural e manejo**

As concentrações de reserva dos micronutrientes seguiram a ordem: Fe > Mn > Zn > Cu. O Fe e o Mn apresentaram maiores variações dos teores, variando de 400 a 85300 mg kg<sup>-1</sup> e 2,3 a 659 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente) (Tabela 3). Este comportamento pode estar relacionado à grande extensão da área de amostragem, onde há influência de diferentes materiais de origem, além da variação textural nos locais estudados (Figura 2).

Os teores de reserva médios dos micronutrientes (Tabela 3), foram inferiores aos valores médios encontrados por Biondi et al. (2011) nos solos de referência da zona da Mata de Pernambuco (Fe- 21,42 e 38,73 g kg<sup>-1</sup>; Mn- 115,85 e 97,72 mg kg<sup>-1</sup>; Zn- 30,76 e 22,51 mg kg<sup>-1</sup> e Cu- 8,86 e 8,21 mg kg<sup>-1</sup>, em superfície e subsuperfície, respectivamente), e dos solos de referência do estado da Paraíba para Mn, Zn e Cu (268,33 mg kg<sup>-1</sup>; 16,97 mg kg<sup>-1</sup> e 10,25 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente) (ALMEIDA JUNIOR et al., 2016). Os teores de reserva mais baixos podem ser devidos ao cultivo sucessivo da cana-de-açúcar nesses solos, sem a reposição adequada dos micronutrientes, resultando em redução desses elementos no solo.

**Tabela 3.** Estatística descritiva dos teores reserva e disponíveis de micronutrientes em solos cultivados com cana soca em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba

<b>Disponível</b>						
(0,0 – 0,2 m)						
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	DP ( $\pm$ )	CV (%)
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	66,6	45,9	12,2	270,1	56,0	84,1
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	12,2	6,6	0,7	64,3	14,4	118,4
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	2,3	2,0	0,6	6,7	1,3	56,6
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	1,1	0,9	0,1	3,5	0,8	71,7
(0,2 – 0,4 m)						
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	69,1	52,5	6,1	244,5	49,9	72,3
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	9,7	3,0	0,4	81,7	15,6	160,7
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	1,2	1,1	0,3	4,0	0,7	58,1
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	0,8	0,6	0,1	3,9	0,8	91,0
<b>Reserva</b>						
(0,0 – 0,2 m)						
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	DP ( $\pm$ )	CV (%)
Fe (g kg <sup>-1</sup> )	18,6	12,4	0,4	85,3	18,1	97,6
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	82,5	21,9	2,3	659,4	146,0	177,0
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	13,6	7,6	2,0	51,1	13,5	99,7
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	7,1	4,4	0,9	26,7	7,2	100,4
(0,2 – 0,4 m)						
Fe (g kg <sup>-1</sup> )	18,6	11,7	0,3	86,8	19,0	102,0
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	88,8	16,3	3,3	653,7	168,5	189,8
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	14,1	7,4	0,9	58,9	15,9	113,3
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	7,2	3,1	0,7	31,9	8,6	120,4

DP desvio padrão e CV coeficiente de variação

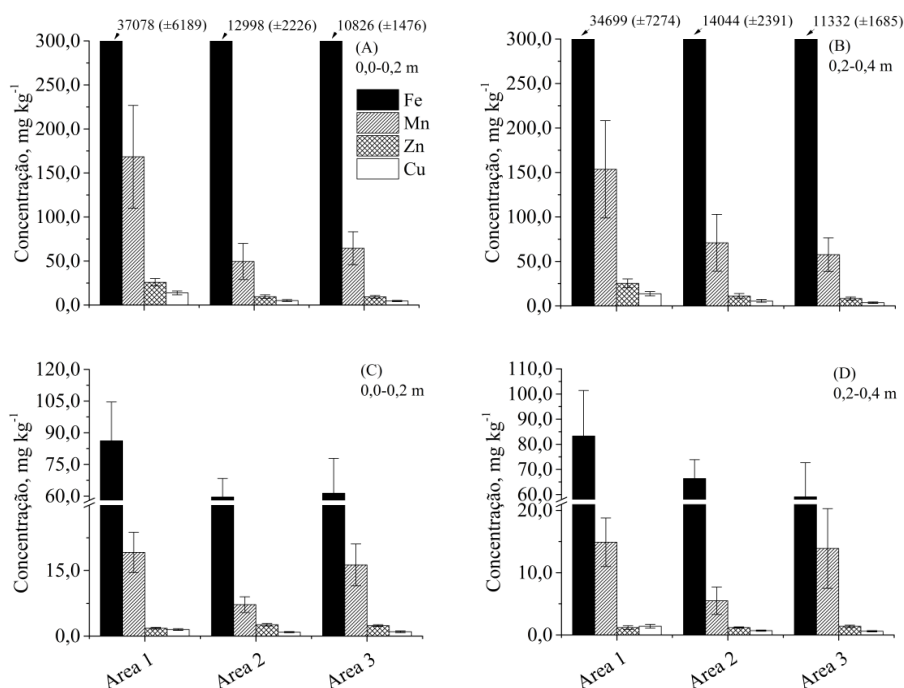
Com relação aos diferentes contextos geológicos, as concentrações de reserva médias dos micronutrientes seguiram a ordem: bacia ígneo-sedimentar > complexo gnaíssico-migmatítico > sedimentos argilo-arenosos (Figura 3 A-B). Os solos da bacia ígneo-sedimentar apresentaram 67%, 70%, 63% e 63% a mais nos teores de reserva de Fe, Mn, Zn e Cu em relação aos solos dos sedimentos argilo-arenosos. A Zona da Mata Pernambucana é classificada como Mata Sul e Mata Norte; essas duas regiões diferem principalmente quanto à geologia. Na Mata Sul predomina o contexto da bacia ígneo-sedimentar, enquanto que, na Mata Norte predomina o contexto de sedimentos argilo-arenosos e complexo gnaíssico-migmatítico (Figura 1). A razão dos teores de reserva mais elevados nos solos da bacia ígnea-sedimentar pode ser devido a maior concentração de argila nesses solos, bem como devido a presença do material geológico mais diversificado, composto de granito e de uma variedade de rochas vulcânicas, incluindo basalto, andesito, traquito e riolito (LONG et al., 1986).

Em solos cultivados com cana-de-açúcar no contexto da bacia ígneo-sedimentar, Araújo (2014) verificou teores médios de 60,5 mg kg<sup>-1</sup> e 21,6 mg kg<sup>-1</sup> de

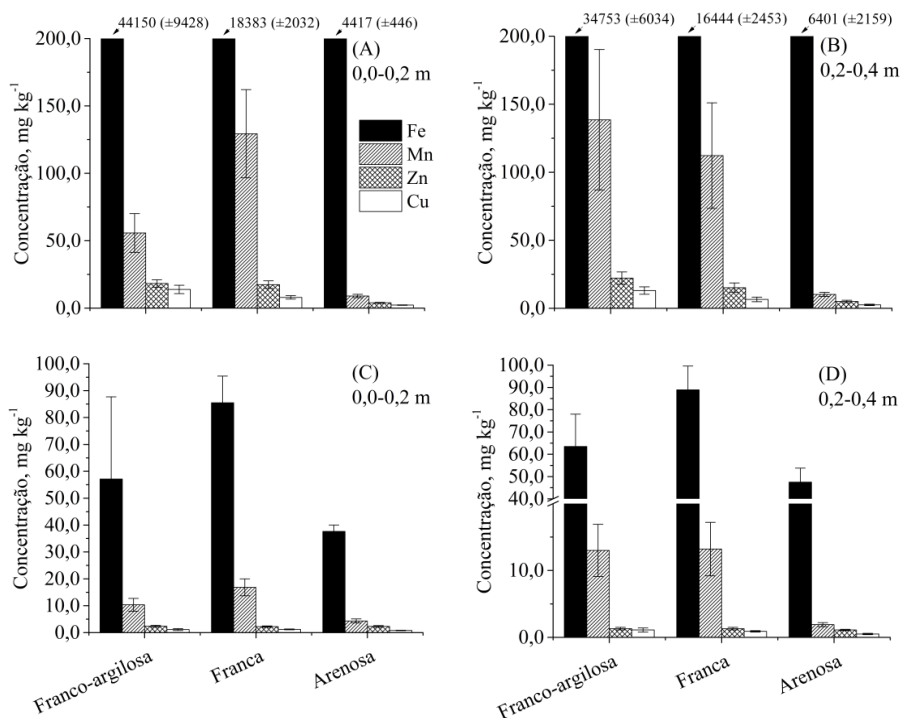


Zn e Cu, respectivamente. No mesmo contexto geológico, Biondi et al. (2011) verificaram teores médios de  $37600 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $174,96 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $41,2 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $16,2 \text{ mg kg}^{-1}$  de Fe, Mn, Zn e Cu, respectivamente, enquanto que na região de predomínio de sedimentos argilo-arenosos e complexo gnaíssico-migmatítico, estes autores verificaram teores bem inferiores ( $9900 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $73,63 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $23,3 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $3,5 \text{ mg kg}^{-1}$  de Fe, Mn, Zn e Cu, respectivamente). Esses dados corroboram o encontrado neste trabalho (Figura 3).

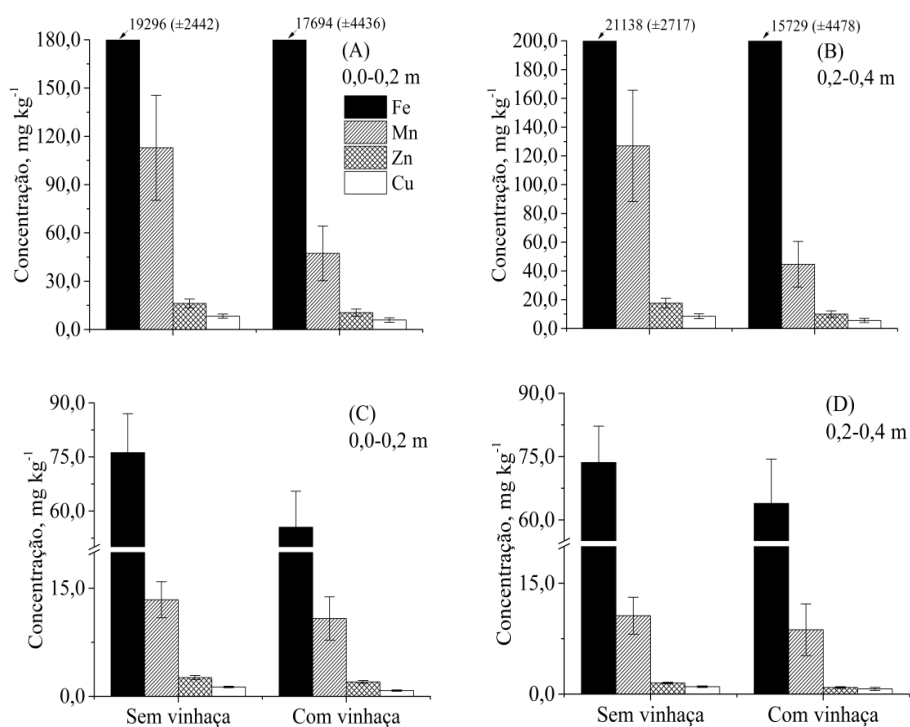
Com relação a influência da textura do solo nos teores reserva dos micronutrientes, com exceção do teor de Mn na camada 0,0-0,2 m, as concentrações dos micronutrientes seguiram a ordem: franco-argilosa > franca > arenosa (Figura 4 A-B). Este resultado reforça a influência da textura nos teores de micronutrientes no solo, ou seja, com a redução do teor de argila reduziram-se os teores de Fe, Zn e Cu. Quanto ao manejo de adubação (com vinhaça e sem vinhaça) (Figura 5 A-B), somente os teores de Mn sofreram influência entre os manejos. No manejo convencional (com fornecimento apenas de N, P e K), o teor médio de Mn foi o dobro do teor nos solos que recebem vinhaça.



**Figura 3.** Teores médios ( $\pm$  erro padrão) reservas (A-B) e disponíveis (C-D) de Fe, Mn, Zn e Cu em solos cultivados com cana soca em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba quanto ao contexto geológico, nas profundidades de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m. Área 1 solos da bacia ígneo-sedimentar, Área 2 solos sob os sedimentos argilo-arenosos e Área 3 solos do complexo gnaíssico-migmatítico



**Figura 4.** Teores médios ( $\pm$  erro padrão) reservas (A-B) e disponíveis (C-D) de Fe, Mn, Zn e Cu em solos cultivados com cana soca em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba quanto a classe textural, nas profundidades de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m



**Figura 5.** Teores médios ( $\pm$  erro padrão) reservas (A-B) e disponíveis (C-D) de Fe, Mn, Zn e Cu em solos cultivados com cana soca em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba quanto ao manejo de adubação, nas profundidades de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m

Com relação à disponibilidade dos micronutrientes, as maiores concentrações de Fe e Mn foram verificadas nos solos de textura média (Figura 4 C-D), enquanto os teores de Zn e Cu disponíveis não foram influenciados pela variação textural do solo,

nas duas profundidades. Embora os teores de reserva de Zn e Cu tenham sido maiores nos solos com maior teor de argila, esse comportamento não se repetiu com os teores disponíveis. A concentração média disponível nos solos argilosos foi similar a dos solos arenosos. Este resultado indica que maior parte das concentrações de Zn e Cu nos solos com maior teor de argila está adsorvida nos colóides do solo de forma não prontamente disponível para as plantas.

Quanto ao tipo de manejo de adubação da cana-de-açúcar, não houve diferença significativa nos teores de micronutrientes disponíveis entre os manejos (com e sem vinhaça) (Figura 5 C-D). A vinhaça utilizada no manejo da adubação é um subproduto derivado da cana-de-açúcar, como a própria cultura apresenta naturalmente teores baixos de micronutrientes, conseqüentemente, este produto pouco contribuirá para incrementos desses nutrientes no solo.

Em geral, a disponibilidade dos micronutrientes avaliados é satisfatória para o desenvolvimento da cana-de-açúcar (Tabela 3). Contudo, existe uma grande variação da disponibilidade de Mn na região de estudo. Comparando a média geral dos teores de Mn disponível ( $12,2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) com a média dos solos separados por ambientes geológicos, 36% das amostras de solo da bacia ígneo-sedimentar apresentam teores mais alto que a média, enquanto para solos do ambiente de sedimentos argilo-arenosos, 69% das amostras estão abaixo do valor médio (Figura 3 C-D). Esses dados reforçam a importância de levar em consideração a variação textural dos solos nas recomendações de adubação.

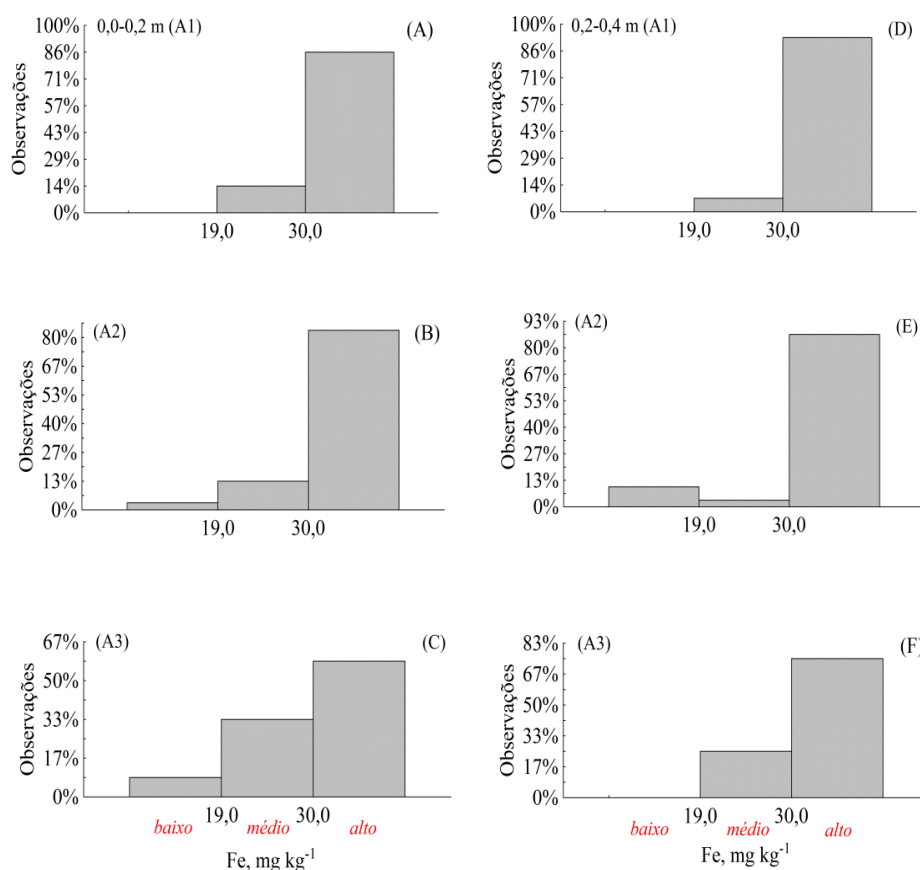
Alta disponibilidade de Fe e Zn foi medida nos solos, independentemente do contexto geológico. Em média 70% dos solos apresentaram concentrações acima de  $30 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$  de Fe e Zn, respectivamente (Figuras 6 e 8). Este resultado está de acordo com encontrados por Oliveira e Nascimento (2006) e Nascimento et al. (2006), em solos de referência do estado de Pernambuco.

Embora a fertilização com fontes primárias de micronutrientes seja negligenciada na cultura da cana-de-açúcar no Nordeste, os fertilizantes, principalmente as fontes fosfatadas e os corretivos, podem conter teores consideráveis de impurezas desses elementos (CARVALHO et al., 2012) e serem a razão para os teores Zn disponíveis adequado nos solos.

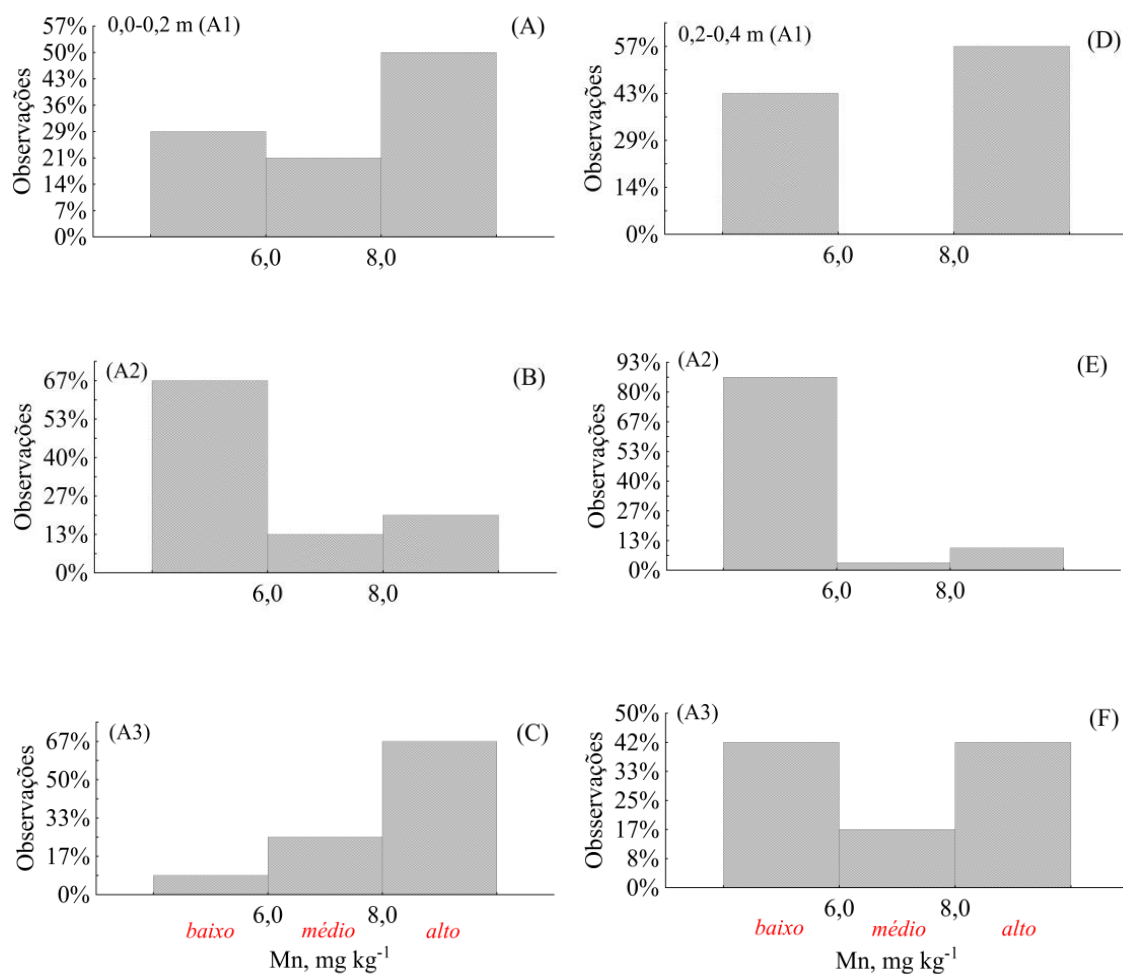
Com exceção do Zn, maior disponibilidade dos micronutrientes foi observada nos solos desenvolvidos na bacia ígneo-sedimentar (Figuras 6, 7 e 9). Os solos desenvolvidos no ambiente de sedimentos argilo-arenosos apresentaram baixa

disponibilidade de Mn, 67% das amostras tiveram concentrações inferiores a  $6 \text{ mg kg}^{-1}$  (Figura 7). Este resultado pode estar relacionado aos menores teores de matéria orgânica e capacidade de troca catiônica (Tabela 2). Chaves e Farias (2009), ao avaliarem a disponibilidade de Mn em solos com textura variando de franco arenosa a franco argilosa sob cultivo de cana-de-açúcar no estado da Paraíba, verificaram que 90,8% apresentaram teores abaixo de  $1,9 \text{ mg kg}^{-1}$ .

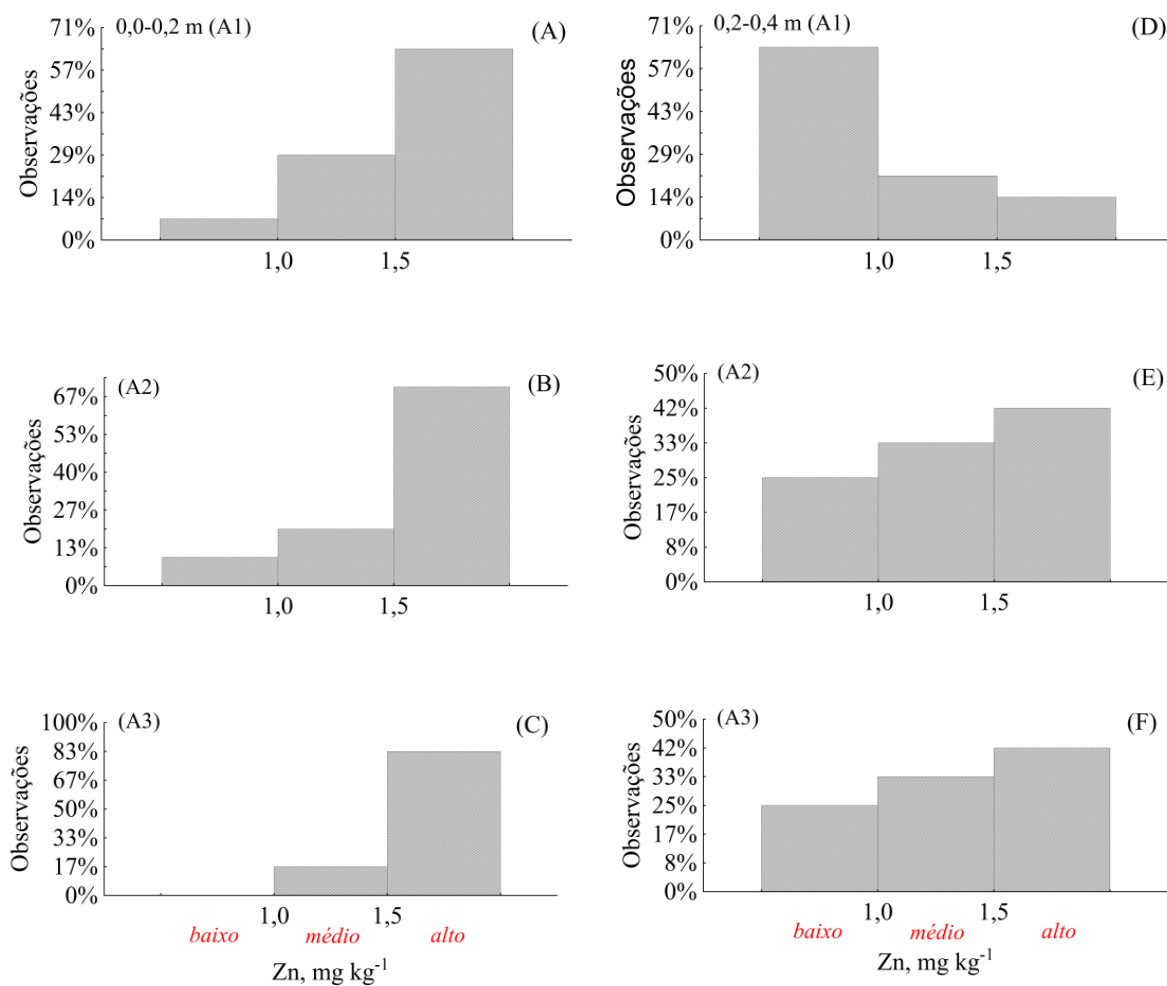
Exceto para os solos da bacia ígneo-sedimentar, baixa disponibilidade de Cu foi verificada nos solos estudados. Cerca de 50% das amostras do ambiente de sedimentos argilo-arenosos e do ambiente do complexo gnaíssico-migmatítico apresentaram teores abaixo de  $0,8 \text{ mg kg}^{-1}$  (Figura 9). Nos solos de referência da Zona da Mata de Pernambuco foi verificado um teor médio de  $3,0 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cu (NASCIMENTO et al., 2006). Estes dados sugerem que o cultivo contínuo de cana-de-açúcar implica na redução de teores de Cu nesses solos.



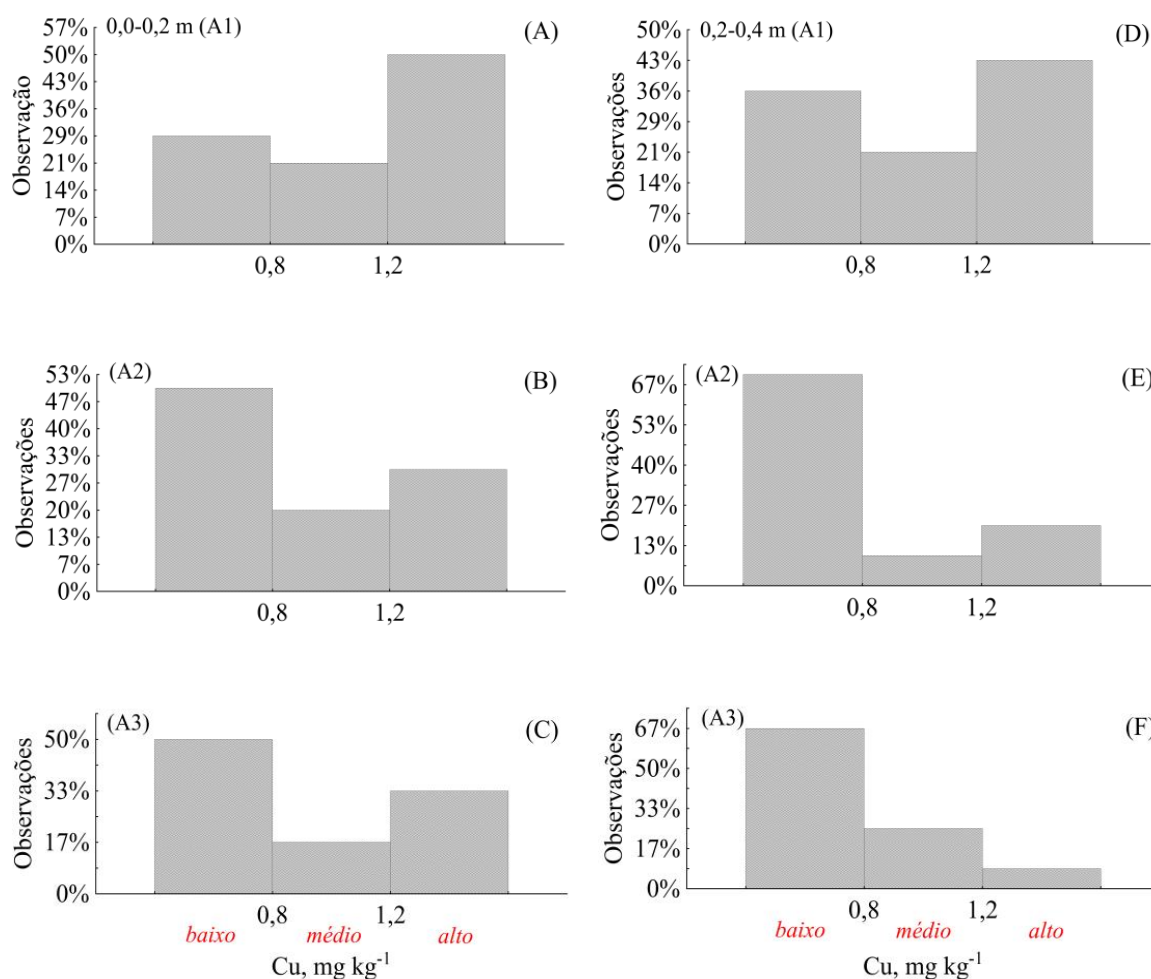
**Figura 6.** Frequência de distribuição dos teores disponíveis de Fe nos solos amostrados nas profundidades de 0,0-0,2 m (A, B e C) e 0,2-0,4 m (D, E e F) cultivados com cana-de-açúcar. A1 solos da região da bacia ígneo-sedimentar, A2 solos da região dos sedimentos argilo-arenosos e A3 solos da região do complexo gnaíssico-migmatítico. Baixo, médio e alto, são adaptações feitas por Pereira et al. (2001)



**Figura 7.** Frequência de distribuição dos teores disponíveis de Mn nos solos amostrados nas profundidades de 0,0-0,2 m (A, B e C) e 0,2-0,4 m (D, E e F) cultivados com cana-de-açúcar. A1 solos da região da bacia ígneo-sedimentar, A2 solos da região dos sedimentos argilo-arenosos e A3 solos da região do complexo gnaíssico-migmatítico. Baixo, médio e alto, são adaptações feitas por Pereira et al. (2001)



**Figura 8.** Frequência de distribuição dos teores disponíveis de Zn nos solos amostrados nas profundidades de 0,0-0,2 m (A, B e C) e 0,2-0,4 m (D, E e F) cultivados com cana-de-açúcar. A1 solos da região da bacia ígneo-sedimentar, A2 solos da região dos sedimentos argilo-arenosos e A3 solos da região do complexo gnáissico-migmatítico. Baixo, médio e alto, são adaptações feitas por Pereira et al. (2001)



**Figura 9.** Frequência de distribuição dos teores disponíveis de Cu nos solos amostrados nas profundidades de 0,0-0,2 m (A, B e C) e 0,2-0,4 m (D, E e F) cultivados com cana-de-açúcar. A1 solos da região da bacia ígneo-sedimentar, A2 solos da região dos sedimentos argilo-arenosos e A3 solos da região do complexo gnaíssico-migmatítico. *Baixo*, *médio* e *alto*, são adaptações feitas por Pereira et al. (2001)

Dado as relações existentes entre os teores de micronutrientes e os atributos físicos e químicos do solo (textura, pH, MOS e CTC), a análise de componentes principais (ACP) foi utilizada para identificar as variáveis que mais influenciaram os teores reserva e disponíveis de Fe, Mn, Zn e Cu no solo. Quatro componentes principais (CP) foram formadas (Tabela 4). A componente principal CP1 explicou 49% da variância total.

**Tabela 4.** Matriz da análise de componentes principais entre os teores disponíveis e reserva de Fe, Mn, Zn e Cu com outras propriedades físicas e químicas de solos cultivados com cana soca em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba, e, em diferentes profundidades

Variáveis	Profundidade 0,0 - 0,2 m			
	CP1	CP2	CP3	CP4
Ph	0,18	-0,16	<b>-0,73</b>	0,33
CTC	0,49	<b>0,70</b>	0,08	-0,10
MOS	-0,01	<b>0,94</b>	0,04	0,01
Areia	<b>-0,62</b>	<b>-0,74</b>	-0,08	0,06
Silte	<b>0,85</b>	0,40	0,08	-0,09
Argila	0,23	<b>0,90</b>	0,05	-0,02
Fe <sub>R</sub>	0,53	<b>0,61</b>	-0,18	0,17
Mn <sub>R</sub>	<b>0,91</b>	0,05	0,09	-0,11
Zn <sub>R</sub>	<b>0,92</b>	0,30	0,15	0,01
Cu <sub>R</sub>	<b>0,79</b>	0,46	0,10	0,08
Fe <sub>D</sub>	0,23	0,02	<b>0,76</b>	-0,01
Mn <sub>D</sub>	<b>0,87</b>	0,00	-0,02	-0,12
Zn <sub>D</sub>	-0,20	-0,01	-0,04	<b>0,89</b>
Cu <sub>D</sub>	0,43	-0,02	<b>0,68</b>	0,43
Autovalor	6,86	1,94	1,52	1,17
% VE	49,00	13,88	10,83	8,33
% VA	49,00	62,87	73,70	82,04
	Profundidade 0,2 - 0,4 m			
	CP1	CP2	CP3	CP4
pH	0,38	-0,28	<b>0,51</b>	0,16
CTC	<b>0,62</b>	0,42	0,04	0,15
MOS	-0,02	<b>0,91</b>	0,05	0,08
Areia	<b>-0,61</b>	<b>-0,74</b>	0,15	0,07
Silte	<b>0,85</b>	0,31	-0,22	-0,06
Argila	0,24	<b>0,92</b>	-0,06	-0,06
Fe <sub>R</sub>	<b>0,53</b>	<b>0,61</b>	0,13	0,07
Mn <sub>R</sub>	<b>0,93</b>	0,05	0,02	0,01
Zn <sub>R</sub>	<b>0,94</b>	0,21	-0,09	0,10
Cu <sub>R</sub>	<b>0,86</b>	0,33	-0,03	0,22
Fe <sub>D</sub>	0,11	-0,04	<b>-0,85</b>	-0,01
Mn <sub>D</sub>	<b>0,82</b>	-0,03	0,11	-0,07
Zn <sub>D</sub>	0,03	-0,00	0,01	<b>0,96</b>
Cu <sub>D</sub>	<b>0,58</b>	0,05	<b>-0,53</b>	0,45
Autovalor	6,65	2,07	1,37	1,13
% VE	47,47	14,81	9,78	8,09
% VA	47,47	62,28	72,06	80,15

CP componente principal, CTC capacidade de troca catiônica, MOS matéria orgânica do solo, %VE percentual de variância explicada, %VA percentual de variância acumulada, índice R expressa teor reserva e índice D teor disponível. Valores em negrito e itálico representam as variáveis relacionadas aos componentes

Em geral, o teor de silte correlacionou positivamente com o teor reserva de todos os elementos, bem como com o Mn disponível, enquanto que o teor de areia correlacionou-se negativamente com a MOS, CTC e os teores de todos os micronutrientes (Figura 10). Esta influência da textura do solo nos teores reserva de



Fe, Mn, Zn e Cu pode ser observada na figura 5, onde as maiores concentrações desses elementos foram nos solos de textura franco-argilosa e franca e as menores na textura arenosa. As frações mais finas do solo (silte e argila) e a matéria orgânica apresentam maior capacidade de troca catiônica, com isso, são responsáveis pela maior adsorção e manutenção desses elementos nos solos (McBRIDE, 1994).

Os teores de Fe, Mn, Zn e Cu reserva correlacionaram-se positivamente. Esses elementos têm uma mesma fonte em comum no solo, a exemplo dos minerais olivina e biotita (SILLANPÄÄ, 1972) presentes em rochas. O material de origem influencia na ocorrência e distribuição dos teores reserva desses elementos no solo. No contexto geológico da bacia ígneo-sedimentar, Araújo (2014) verificou concentrações mais elevadas de Zn ( $76,4 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e Cu ( $48,3 \text{ mg kg}^{-1}$ ) em perfil com material de origem básico (basalto), enquanto que, teores mais baixos em superfície foram observados em solos com material de origem mais ácido, desenvolvido de sedimentos da Formação Barreiras ( $3,6 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $0,02 \text{ mg kg}^{-1}$ , para Zn e Cu, respectivamente).

Correlação positiva forte foi constatada entre o teor de argila, MOS, CTC e Fe de reserva. Os minerais de argila e a matéria orgânica apresentam alta capacidade de reter cátions. Na faixa de pH agricultável, as superfícies dos minerais de argilas e da matéria orgânica, principalmente dos grupos funcionais carboxílicos, estão em grande parte dissociados, apresentando elevada capacidade de adsorver os cátions no solo (McBRIDE, 1994).

Com relação a influência da reserva potencial na disponibilidade dos micronutrientes, correlação positiva foi verificada apenas para o Mn (Figura 10). Os solos com maior teor reserva deste elemento apresentaram maiores teores disponíveis (Figura 3).

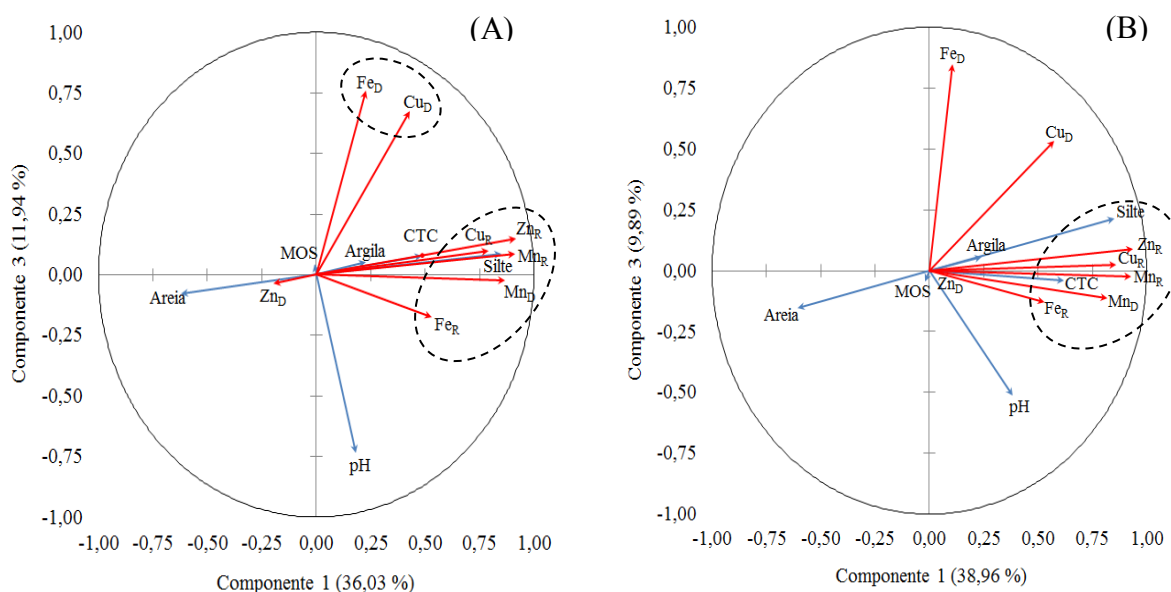
O pH correlacionou-se negativamente com as concentrações disponíveis de Fe e Cu no solo. A elevação do pH do solo reduz a solubilidade dos metais catiônicos, deixando em formas não trocáveis (ALLOWAY, 2013) devido à maior capacidade de adsorção das superfícies sólidas do solo resultantes do aumento da carga negativa dependente do pH, da formação de formas hidrolisadas e da co-precipitação em óxidos de Fe (ALLOWAY, 2009).

Embora esse efeito do pH ocorra em geral para os todos os micronutrientes catiônicos, a ACP identifica entre os atributos avaliados (pH, MOS, CTC e textura) quais variáveis apresenta maior grau de correlação com a disponibilidade de determinado elemento. Neste trabalho, o pH foi o atributo que apresentou maior

correlação com os elementos Fe e Cu e não influenciou a disponibilidade de Mn e Zn; pode-se deduzir pela análise que outras variáveis apresentaram maior peso para esses elementos do que o pH.

Outra possível explicação da influência do pH apenas para o Fe e Cu é o grau de eletronegatividade desses metais, em que eletronegatividades superiores formam limites covalentes mais fortes com átomos de oxigênio a partir de minerais e, portanto, são preferencialmente adsorvidos a eles. Os valores de eletronegatividade para Fe (1.83) Cu (1.90), Zn (1.65) e Mn (1.55) explicam a maior seletividade dos minerais do solo para o Fe e o Cu em comparação com Mn e Zn (McBRIDE, 1994); como também o Fe é o elemento mais influenciado pelo aumento do pH (KABATA-PENDIAS, 2001), devido a elevada afinidade com radicais  $\text{OH}^-$  (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989).

O Zn disponível no solo não se correlacionou com nenhum atributo do solo (Figura 10). Nos solos que apresentaram os maiores teores de argila, matéria orgânica e CTC (solos da bacia ígneo-sedimentar) (Figura 2) a disponibilidade de Zn foi similar a dos solos com os menores teores desses atributos (solos do ambiente de sedimentos argilo-arenosos e do complexo gnaíssico-migmatítico) (Figura 3), indicando que maior parte das concentrações de Zn nos solos com maior teor de argila está associada principalmente a frações não trocáveis. Isso possivelmente pode ter contribuído para ausência de correlação entre o Zn disponível e os atributos físicos e químicos do solo (Figura 10).



**Figura 10.** Círculos de correlação múltipla entre os teores disponíveis e reserva de Fe, Mn, Zn e Cu com algumas propriedades físicas e químicas dos solos cultivados com cana soca nos estados de Pernambuco e Paraíba, nas profundidades de 0,0-0,2 m (A) e 0,2-0,4 m (B). MOS matéria orgânica do solo, CTC capacidade de troca catiônica, índice *R* expressa teor reserva e índice *D* teor disponível

### 4.3 Teores de micronutrientes na planta e suas relações com teores reserva e disponíveis no solo

As concentrações foliares dos micronutrientes seguiram a ordem: Fe > Mn > Zn > Cu. Os elementos Fe e Mn apresentaram as maiores variações, com valores de 45 mg kg<sup>-1</sup> a 378 mg kg<sup>-1</sup> e 5,1 mg kg<sup>-1</sup> a 214,4 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. O Mn apresentou o maior coeficiente de variação e a maior diferença entre a média e mediana, indicando que a maior parte dos valores é baixo, o que corrobora os relatos de deficiência de Mn nessas áreas (Tabela 5).

Os canaviais avaliados apresentaram teores adequados de Fe, com média geral (142,4 mg kg<sup>-1</sup>) dentro da faixa descrita por Malavolta (1997), que classificou como adequados os teores de 50 a 150 mg kg<sup>-1</sup>. O teor foliar de Cu situou-se abaixo do considerado adequado por este autor, contudo, está adequado por Reis Jr. e Monnerat (2002), que encontraram valores médios de 5,0 mg kg<sup>-1</sup> em canaviais com produtividade superior a 75 t ha<sup>-1</sup>.

Em geral, os teores foliares de Mn e Zn situaram-se abaixo do considerado adequado pela literatura, com valores médios de 36,7 mg kg<sup>-1</sup> e 11,0 mg kg<sup>-1</sup>,

respectivamente (Tabela 5). Em canaviais com produtividades superiores a 75 t ha<sup>-1</sup>, foram constatadas concentrações médias de 74,4 mg kg<sup>-1</sup> e 56 mg kg<sup>-1</sup>, para Mn; 14,3 mg kg<sup>-1</sup> e 18,2 mg kg<sup>-1</sup>, para Zn, por Reis Jr. e Monnerat (2002) e Píperas, Creste e Echer (2009), respectivamente. Portanto, os baixos teores desses elementos nas plantas pode ser uma das razões para as produtividades baixas (60 t ha<sup>-1</sup> em média) da região de estudo.

**Tabela 5.** Estatística descritiva dos teores de micronutrientes na folha diagnose de cana soca, com cinco meses de idade, cultivada em diferentes regiões de Pernambuco e Paraíba

	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	DP (±)	CV (%)
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	142,4	145,5	45,0	378,0	80,3	56,4
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	36,7	22,9	5,1	214,4	40,6	110,4
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	11,0	10,7	7,1	17,0	2,5	22,4
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	5,0	4,8	2,6	8,6	1,2	24,6

*DP* desvio padrão e *CV* coeficiente de variação

Os teores médios dos micronutrientes verificados na folha +3 da cana-de-açúcar, em função do contexto geológico, classe textural e manejo de adubação, encontram-se na figura 11. Diferença significativa dos teores foliares de Mn foi observada entre os três ambientes estudados (Figura 11-A).

Com exceção do Zn, os teores foliares dos micronutrientes estão adequados para o desenvolvimento da cana-de-açúcar no ambiente da bacia ígneo-sedimentar. O ambiente de sedimentos argilo-arenosos apresentou as menores concentrações foliares para todos os elementos, um reflexo da disponibilidade de micronutrientes nesses solos (Figura 3). Dos contextos geológicos avaliados, apenas os canaviais da bacia ígneo-sedimentar apresentaram teores satisfatórios de Mn.

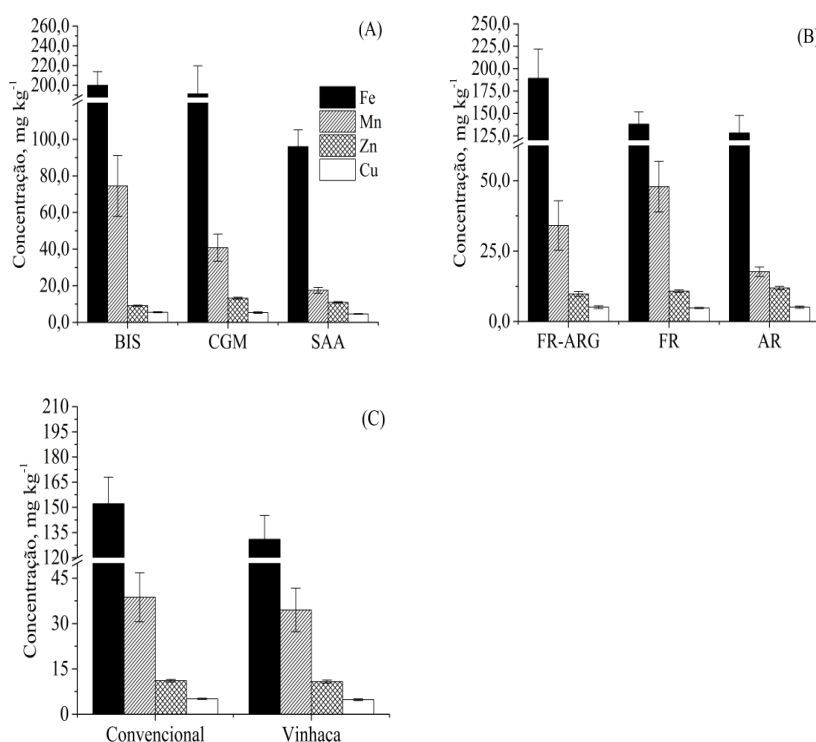
O teor médio foliar de Mn encontrado nos canaviais desenvolvidos nos solos do ambiente de sedimentos argilo-arenosos foi similar à média observada por Silva (2011) em cultivos nos tabuleiros costeiros em Alagoas (17 mg kg<sup>-1</sup>), ambiente com predominância de sedimentos arenosos. No mesmo Estado, Moura Filho et al. (2014) verificaram concentrações foliares variando de 4,8 mg kg<sup>-1</sup> a 11,5 mg kg<sup>-1</sup>. Estes resultados revelam a baixa disponibilidade de Mn nos solos arenosos do Nordeste e a provável resposta dos cultivos à aplicação desse micronutriente.

Embora, o Zn disponível no solo esteja classificado como alto (Figura 8), os teores encontrados na folha +3 da cana-de-açúcar situaram-se abaixo do considerado adequado para o bom desenvolvimento da cana-de-açúcar, independentemente do

contexto geológico.

Com relação à influência da textura do solo nos teores de micronutrientes na folha +3 da cana-de-açúcar (Figura 11-B), o teor médio foliar de Fe decresceu à medida que reduziu o teor de argila. Nos canaviais desenvolvidos no solo de textura franco-argilosa, o teor de Mn foi ligeiramente menor que os desenvolvidos nos solos de textura franca, contudo, nessas duas classes texturais foram verificados os maiores teores foliares em comparação aos teores foliares de Mn dos canaviais desenvolvidos nos solos de textura arenosa. Os solos com maior teor de argila possuem maior capacidade de troca catiônica em relação aos solos arenosos, conseqüentemente, tende a adsorver maior concentração de cátions de forma trocável, possibilitando maior disponibilidade para plantas.

As concentrações foliares de Zn e Cu não sofreram influência da textura do solo (Figura 11-B). Os teores foliares desses elementos seguiram o mesmo comportamento da disponibilidade no solo. Embora exista uma variação textural, a disponibilidade nos solos com maior teor argila foi similar a dos arenosos (Figura 4-C), refletindo nos teores foliares. Quanto ao manejo de adubação, os teores foliares dos micronutrientes não foram influenciados por este fator (Figura 11-C).



**Figura 11.** Teores médios ( $\pm$  erro padrão) de Fe, Mn, Zn e Cu na folha diagnose de cana soca, com cinco meses de idade, cultivadas em solos sobre diferente contexto geológico (A), diferente classe textural (B) e diferente manejo (C), nos estados de Pernambuco e Paraíba. *BIS* solos da bacia ígneo-sedimentar, *CGM* solos do complexo gnaíssico-migmatítico, *SAA* solos sobre os sedimentos argilo-arenosos, *FR-ARG* textura franco-argilosa, *FR* textura franca e *AR* textura arenosa

Neste trabalho, os teores foliares de micronutrientes apresentaram maior similaridade com os de levantamentos mais recentes, desenvolvidos em outros Estados do Brasil (REIS JR.; MONNERAT, 2002; PÍPERAS; CRESTE; ECHER, 2009; SILVA, 2011), diferentemente dos valores encontrados por Malavolta (1997), que classifica como adequado as concentrações de 50-125 mg kg<sup>-1</sup>, 25-30 mg kg<sup>-1</sup> e 8-10 mg kg<sup>-1</sup>, para Mn, Zn e Cu, respectivamente; estes valores vêm sendo usados frequentemente como padrão, no entanto, encontram-se defasados, principalmente para os elementos Zn e Cu. Além disso, fica claro a necessidade de realizar a calibração dos teores de micronutrientes em cana-de-açúcar para a região Nordeste, uma vez que os trabalhos citados foram desenvolvidos em solos e clima diferentes. É possível que critérios estabelecidos regionalmente forneçam maior confiança à diagnose nutricional (REIS JR.; MONNERAT, 2002).

Dado as relações existentes entre os teores foliares dos nutrientes na planta com os teores dos elementos nos solos e suas interações, a ACP foi utilizada para identificar as variáveis que mais influenciaram os teores foliares de micronutrientes na folha +3 da cana-de-açúcar. Seis componentes principais foram formadas (Tabela 6), no entanto, neste trabalho serão discutidos sobre as relações estabelecidas nas componentes CP1, CP5 e CP6, onde foram identificadas as relações com os teores foliares e as demais variáveis analisadas. A componente principal CP1 incluindo o Mn foliar, Mn disponível no solo, os teores reserva de Fe, Mn, Zn e Cu e a relação Fe/Mn explicou 35,8% da variância total.

**Tabela 6.** Matriz da análise de componentes principais entre os teores de Fe, Mn, Zn e Cu na folha diagnose de cana soca, com cinco meses de idade, e nos solos cultivados nos estados de Pernambuco e Paraíba

Variáveis	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Fe <sub>P</sub>	-0,04	-0,05	0,06	0,28	<b>0,86</b>	0,04
Mn <sub>P</sub>	<b>0,69</b>	0,22	0,13	0,11	0,18	-0,25
Zn <sub>P</sub>	-0,01	-0,04	0,07	-0,45	0,48	<b>0,53</b>
Cu <sub>P</sub>	-0,04	-0,08	0,16	0,19	<b>0,83</b>	0,18
Fe <sub>D(1)</sub>	0,19	<b>0,93</b>	0,15	-0,00	-0,00	0,04
Fe <sub>D(2)</sub>	-0,02	<b>0,96</b>	0,01	0,02	-0,06	0,07
Mn <sub>D(1)</sub>	<b>0,94</b>	0,05	0,01	0,13	0,09	-0,05
Mn <sub>D(2)</sub>	<b>0,91</b>	0,03	-0,00	0,03	-0,01	-0,06
Zn <sub>D(1)</sub>	-0,18	-0,15	0,09	0,00	0,13	<b>0,87</b>
Zn <sub>D(2)</sub>	0,07	-0,06	0,47	-0,05	0,09	<b>0,64</b>
Cu <sub>D(1)</sub>	0,21	0,40	<b>0,75</b>	0,17	-0,05	0,19
Cu <sub>D(2)</sub>	0,32	0,43	<b>0,76</b>	0,25	-0,07	-0,01
Fe/Mn <sub>(1)</sub>	<b>-0,55</b>	0,44	0,01	-0,11	<b>-0,51</b>	-0,23
Fe/Mn <sub>(2)</sub>	<b>-0,52</b>	0,33	-0,34	0,09	-0,47	0,07
Fe/Zn <sub>(1)</sub>	0,20	<b>0,87</b>	0,08	-0,02	-0,04	-0,33
Fe/Zn <sub>(2)</sub>	-0,15	<b>0,74</b>	-0,41	0,14	-0,20	-0,21
Fe/Cu <sub>(1)</sub>	0,01	0,40	<b>-0,67</b>	-0,15	-0,23	-0,16
Fe/Cu <sub>(2)</sub>	-0,20	0,25	<b>-0,80</b>	-0,05	-0,33	-0,06
Fe <sub>R(1)</sub>	0,19	-0,02	-0,00	<b>0,92</b>	0,19	-0,05
Fe <sub>R(2)</sub>	0,30	-0,04	0,02	<b>0,89</b>	0,14	0,00
Mn <sub>R(1)</sub>	<b>0,87</b>	0,01	0,16	0,31	-0,06	-0,06
Mn <sub>R(2)</sub>	<b>0,87</b>	0,03	0,18	0,27	-0,11	0,01
Zn <sub>R(1)</sub>	<b>0,74</b>	0,15	0,23	<b>0,56</b>	0,03	-0,05
Zn <sub>R(2)</sub>	<b>0,79</b>	0,16	0,26	0,46	0,00	0,03
Cu <sub>R(1)</sub>	0,49	0,08	0,30	<b>0,77</b>	0,08	-0,05
Cu <sub>R(2)</sub>	<b>0,61</b>	0,09	0,32	<b>0,64</b>	0,05	0,05
Autovalor	9,67	5,04	2,82	2,23	1,66	1,10
% VE	35,80	18,67	10,45	8,25	6,14	4,07
% VA	35,80	54,47	64,92	73,17	79,31	83,38

Índice *P* expressa teor do elemento na planta, índice *D* teor disponível no solo, índice *R* teor reserva no solo, *Fe/Mn*; *Fe/Zn*; *Fe/Cu* relação entre os teores disponíveis desses elementos no solo, *1* profundidade de 0,0-0,2 m e *2* profundidade de 0,2-0,4 m. *CP* componente principal, *%VE* percentual da variância explicada e *%VA* percentual da variância acumulada. Valores em negrito e itálico representam as variáveis relacionadas aos componentes

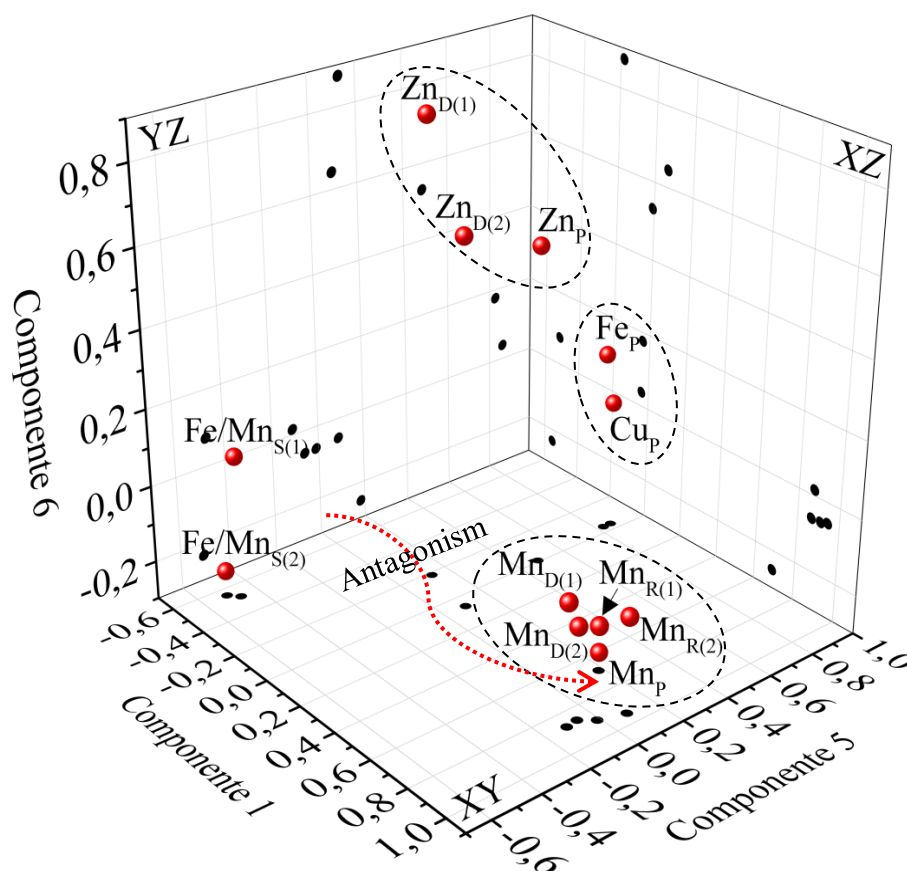
Dos elementos avaliados na folha +3 da cana-de-açúcar, somente Mn e Zn são explicados pela disponibilidade no solo (Figura 12). As maiores concentrações disponíveis no solo implicaram em maiores concentrações na planta. Correlação positiva forte foi estabelecida entre os teores foliares de Mn e Zn com os teores disponíveis desses elementos nas duas profundidades (0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m) (Figura 12), revelando a contribuição dos teores desses elementos presentes nas camadas subsuperficiais na nutrição da cana-de-açúcar, bem como a efetividade do sistema radicular da cultura em absorver os nutrientes além da camada superficial.

Relação positiva foi estabelecida entre os teores de Fe e Cu na folha (Figura 12). Essa interdependência entre esses elementos sugere que a variação em suas distribuições depende de fatores comuns no solo. Neste trabalho foi observado o pH como um fator comum para esses elementos, onde o aumento deste atributo resultou em diminuição das concentrações disponíveis de Fe e Cu no solo (Figura 10).

Interação antagonista foi verificada entre os teores de Mn na folha +3 da cana-de-açúcar e a relação Fe/Mn no solo (Figura 12). Níveis elevados de compostos de Fe em meios de crescimento resultam na diminuição da absorção de vários metais, principalmente de Mn (KABATA-PENDIAS, 2011). Esta interação ocorre provavelmente pelas semelhanças nas propriedades químicas desses íons; ambos são cátions e são absorvidos pelas plantas na forma divalente, com isso podem competir por sítios de adsorção nas paredes celulares e absorção pela planta (ROBSON; PITMAN, 1983).

Com relação à influência dos teores de reserva dos micronutrientes nos teores foliares, apenas o Mn do solo se correlacionou com o Mn na planta. No ambiente da bacia ígneo-sedimentar, foram verificadas as maiores concentrações de reserva de Mn ( $168,4 \text{ mg kg}^{-1}$ ), enquanto os menores teores do elemento foram verificados no ambiente de sedimentos argilo-arenosos ( $49,5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Figura 3). Os teores foliares nesses ambientes foram  $74,5 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $17,5 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente. Isso explica o estabelecimento da relação entre estes compartimentos.





**Figura 12.** Correlações múltiplas entre os teores de Fe, Mn, Zn e Cu na folha diagnose de cana soca e nos solos cultivados em Pernambuco e Paraíba extraída pela análise de componentes principais. Índice *P* teor do micro na planta, índice *D* teor disponível no solo, índice *R* teor reserva no solo,  $Fe/Mn_s$  relação entre os teores disponíveis destes elementos no solo, 1 profundidade 0,0-0,2 m e 2 profundidade 0,2-0,4 m

## 5 CONCLUSÕES

Os teores disponíveis de Fe e Zn, na maioria dos solos das Zonas da Mata de Pernambuco e Paraíba, foram considerados altos, com pouco potencial para deficiências a curto e médio prazo. Por outro lado, os teores de Cu estão baixos na maioria dos solos. Os solos arenosos do ambiente de sedimentos argilo-arenosos cultivados com cana-de-açúcar apresentaram, em especial, baixa disponibilidade de Mn e têm o maior potencial de resposta à aplicação deste micronutriente.

A maioria dos solos apresentou os teores de reserva de Fe, Mn, Zn e Cu menores do que os valores de referência para a região de estudo, indicando redução dos teores desses micronutrientes nos solos cultivados com cana-de-açúcar nas

Zonas da Mata de Pernambuco e Paraíba. Na região de estudo, especialmente devido ao material de origem e textura dos solos, existe uma grande variação dos teores de reserva dos micronutrientes no solo, principalmente de Mn.

Os teores foliares de Mn e Zn na maioria dos cultivos foram considerados abaixo do adequado, apresentando potencial de resposta à adubação na cultura da cana-de-açúcar. Estudos futuros de calibração dos micronutrientes para cultura da cana-de-açúcar no Nordeste são necessários para definição do grau de resposta e para a definição de doses adequadas.

A textura do solo e a CTC foram os principais atributos correlacionados com os teores de reserva dos micronutrientes no solo. Com relação aos teores disponíveis, o pH é o principal atributo que governa a disponibilidade de Fe e Cu, enquanto a textura é responsável por definir os teores disponíveis de Mn nos solos.

## REFERENCIAS

ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007 p. 646-724.

ADORNA, J. C.; CRUSCIOL, C. A. C.; ROSSATO, O. B. Fertilization with filter cake and micronutrients in plant cane. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, p. 649-657, 2013.

ALMEIDA JÚNIOR, A. B.; NASCIMENTO, C. W. A.; SOBRAL, M. F.; SILVA, F. B. S.; GOMES, W. A. Fertilidade do solo e absorção de nutrientes em cana-de-açúcar fertilizada com torta de filtro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.10, p.1004–1013, 2011.

ALLOWAY, B. J. **Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production**. Springer Verlag, 2008, p.354.

ALLOWAY, B. J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. **Environmental Geochem Health**. v. 31, p. 537–548, 2009.

ALLOWAY, B. J. **Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability**. 3 ed. Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013, p.614.

ALMEIDA JÚNIOR, A. B.; NASCIMENTO, C. W. A.; SOBRAL, M. F.; SILVA, F. B. V.; GOMES, W. A. Fertilidade do solo e absorção de nutrientes em cana-de-açúcar fertilizada com torta de filtro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.10, p.1004-1013, 2011.

ALVAREZ V. V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V. V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa, 1999. p. 30-35.

ARAIN, M. Y.; MEMON, K. S.; AKHTAR, M. S.; MEMON, M. Soil and plant nutrient status and spatial variability for sugarcane in lower Sindh (Pakistan). **Pakistan Journal of Botany**, Karachi, v. 49, n. 2, p. 531-540, 2017.

ARIAS, M.; PÉREZ-NOVO, C.; OSORIO, F.; LÓPEZ, E.; SOTO, B. Adsorption and desorption of copper and zinc in the surface layer of acid soils. **Journal of Colloid and Interface Science**, San Diego, v. 288, p. 21-29, 2005.

ARAÚJO, P. R. M. **Teores de referência e geoquímica de metais pesados em solos da Bacia Cabo – PE**. 2014. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE, 2014.

BECARI, G. R. G. **Resposta da cana-planta à aplicação de micronutrientes**. 2010. 72 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical)-Instituto Agrônomo de Campinas-SP, 2010.

BENETT, C. G. S.; BUZETTI, S.; SILVA, K. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GARCIA, C. M. P.; MAESTRELO, P. R. Produtividade e desenvolvimento da cana planta e soca em função de doses e fontes de manganês. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1661-1668, 2011.

BIONDI, C. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; FABRICIO NETA, A. B.; RIBEIRO, M. R. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni e Co em solos de Referência de Pernambuco. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p.1057-1066, 2011.

BORGES, M. R.; COUTINHO, E. L. M. Metais pesados do solo após aplicação de bio-sólido: I – fracionamento. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 543-555, 2004.

BROADLEY, M.; BROWN, P.; ÇAKMAK, I.; RENGEL, Z.; ZHAO, F. Function of Nutrients: Micronutrients. In: MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3 ed. New York, Academic Press, 2012. cap. 7, p. 193-250.

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial de cobre e manganês em Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agrônoma**, Fortaleza, v. 40, n. 2, p. 211-218, 2009.

CARVALHO, V. G. B.; NASCIMENTO, C. W. A.; BIONDI, C. B.; Potencial de Fertilizantes e Corretivos no Aporte de Micronutrientes ao Solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 931-938, 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar**, Brasília- DF, v. 2, 2015/16, n.4, p. 1-76, 2016.

COSTA FILHO, R.; PRADO, R. M. Zinco na Nutrição e na Produção de Colmos da Terceira Soqueira de cana-de-açúcar cultivada em um Latossolo Vermelho Amarelo. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 26 n3, p. 6-9, 2008.

CPRM - Serviço geológico do Brasil. **Geologia e recursos minerais do estado da Paraíba**. Recife, 2002. 234 p.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa de Geodiversidade do Brasil: Influência da geologia dos grandes geossistemas no uso e ocupação dos terrenos**. Brasília, 2006. 68p.

CPRM - Serviço geológico do Brasil. **Geodiversidade do estado de Pernambuco**. Programa geologia do Brasil Levantamento da geodiversidade. Recife, 2014. 282 p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Pernambuco**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000, 382 p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 225 p.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Micronutrientes. In:FERNANDES, M. S. **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. cap. 13, p. 328-335.

DYNIA, J. F.; BARBOSA FILHO, M. P. Alterações de pH, Eh e disponibilidade de micronutrientes para arroz irrigado em um solo de várzea tratado com calcário e palha de arroz em casa de vegetação. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, p. 67-74, 1993.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 225 p.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Improving nutrient use efficiency of annual crops in brazilian acid Soils for sustainable crop production. **Commun. in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 32, n. 7 & 8, p. 1303–1319, 2001.

FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 24, n. 8, p. 1269-1290, 2001.

FARIAS, C. H. A.; FERNANDES, P. D.; GHEYI, H. R.; DANTAS NETO, J. Qualidade industrial de cana-de-açúcar sob irrigação e adubação com zinco, em Tabuleiro Costeiro paraibano. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.419–428, 2009.

FURTADO A, T.; SCANDIFFIO, M. I. G.; CORTEZ, L. A. B. The Brazilian sugarcane innovation system. **Energy Policy**, Oxford, v. 39, p. 156–166, 2011.

GOES, T.; MARRA, R.; SILVA, G. S. Setor sucroalcooleiro no Brasil Situação atual e perspectivas. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 17, n. 2, 2008.

GUIMARÃES, F. C. N. **Normas DRIS e diagnóstico nutricional de cana-soca na região sul de Goiás**. 2014. 54 f. Dissertação (Agronomia – Produção Vegetal)-Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS, 2014.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Indicadores IBGE: Estatística da Produção Agrícola**. 2017. 72 p.

KABATA-PENDIAS, A. PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3 ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2001. 315p.

KABATA-PENDIAS A. **Trace elements in soils and plants**. 4 ed. Boca Raton, CRC Press, 2011. 413p.

KARIN, H.; SEDBERRY JR., J. E.; MILLER, B. J. The profile distribution of total and DTPA-extractable copper in selected soils in Louisiana. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v.7, n.5, p.437-452, 1976.

KATYAL, J.C.; SHARMA, B. D. DTPA-extractable and total Zn, Cu, Mn, and Fe in Indian soils and their association with some soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 49, p.165-179, 1991.

LONG, L. E.; SIAL, A. N.; NEKVASIL, H.; BORBA, G. S. Origin of granite at Cabo de Santo Agostinho, Northeast Brazil. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, New York, v. 92, p. 341-350, 1986.

MARTÍNEZ, C. E.; MOTTO, H. L. Solubility of lead, zinc and copper added to mineral soils. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 107, p. 153-158, 2000.

MADHURI, K. V. N.; SARALA, N. V.; KUMAR, M. H.; RAO, M. S.; GIRIDHAR, V. Influence of Micronutrients on Yield and Quality of Sugarcane. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 15, n.2, p.187–191. 2013.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, A. S. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 1989. 201p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3 ed. New York:Academic Press, 2012. 649 p.

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

MOURA FILHO, G.; ALBUQUERQUE, A. W.; MOURA, A. B.; SANTOS, A. C. I.; OLIVEIRA FILHO, M. S.; SILVA, L. C. Diagnose nutricional de variedades de cana-de-açúcar em argissolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 11, p.1102-1109, 2014.

MOUTA, E. R.; SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C. Copper Adsorption as a Function of Solution Parameters of Variable Charge Soils. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 19, n. 5, p. 996-1009, 2008.

MESCOUTO, C. S. T.; LEMOS, V. P.; DANTAS FILHO, H. A.; COSTA, M. L.; KERN, D. C.; FERNANDES, K, G. Distribution and Availability of Copper, Iron, Manganese and Zinc in the Archaeological Black Earth Profile from the Amazon Region. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 22, n. 8, p.1484-1492, 2011.

NASCIMENTO, C. W. A.; OLIVEIRA, A. B.; RIBEIRO, M. R.; MELO, E. E. C. Distribution and availability of zinc and copper in benchmark soils of Pernambuco state, Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 37, p. 109-125, 2006.

NASCIMENTO, C. W. A.; MELO, E. E. C.; NASCIMENTO, R. S. M. P.; LEITE, P. V. V. Effect of Liming on the Plant Availability and Distribution of Zinc and Copper among Soil Fractions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 38, p. 545-560, 2007.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G. **A dimensão do setor Sucroenergético: mapeamento e quantificação da safra 2013/14**. Coordenação e organização Ribeirão Preto: Markestrat, Fundace, FEA-RP/USP, 2014.

OLIVEIRA, A. B.; NASCIMENTO, C. W. A. Formas de manganês e ferro em solos de referência de Pernambuco. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 99-110, 2006.

PEREIRA, M. G.; PÉREZ, D. V.; VALLADARES, G. S.; SOUZA, J. M. P. F.; ANJOS, L. H. C. Comparação de métodos de extração de cobre, zinco, ferro e manganês em solos do estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p.655-660, 2001.

PÍPERAS, G. V.; CRESTE, J. E.; ECHER, F. R. Uso do DRIS na avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56, n.6, p. 818-825, 2009.

PRIBYL, D. W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. **Geoderma**, Amsterdam, v. 156, p. 75-83, 2010.

REIS JR., R. A.; MONNERAT, P. H. Diagnose nutricional da cana-de-açúcar em campos dos Goytacazes (RJ). **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p.367-372, 2002.

RIDESA - Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucoalcooleiro. **Catálogo nacional de variedades "RB" de cana-de-açúcar**. Curitiba, 2010. 136 p.

ROBSON, A. D.; PITMAN, M. G. Interactions Between Nutrients in Higher Plants. In: LAUCWI, A.; BIELESKI, R. L. **Inorganic Plant Nutrition**. Berlin: Springer Verlag, 1983. cap. 5, p.147-173.

SHARMA, B. D.; MUKHOPADHYAY, A. S. S.; SIDHU, A, P.S.; KATYAL, A, J.C. Pedospheric attributes in distribution of total and DTPA-extractable Zn, Cu, Mn and Fe in Indo-Gangetic plains. **Geoderma**, Amsterdam, v. 96, p. 131–151, 2000.

SILVA, L. C. **Diagnose nutricional e potencial de resposta a adubação em cana-de-açúcar *Saccharum spp.* na região de tabuleiros costeiros em Alagoas.** 2011. 135 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE, 2011.

SILLANPAA, M. **The trace elements in soils and in agriculture.**: FAO, 1972. 71p. (FAO Soil Bulletin, 17).

SILVEIRA, M. L. A.; ALLEONI, L. R. F. Copper Adsorption in Tropical Oxisols. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 46, n. 4, p. 529-536, 2003.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron Oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. **Minerals in Soil Environments.** 2 ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. cap. 8, p. 379-438.

SHUMAN, L. M. Effect of Liming on the Distribution of Manganese, Copper, Iron, and Zinc Among Soil Fractions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p.1236-1240, 1986.

TASSO JÚNIOR, L. C.; SILVA NETO, H. F.; SILVA, J. D. R.; MARQUES, M. O.; CAMILOTTI, F. Acúmulo de micronutrientes em colmos e palhada decinco cultivares de cana-de-açúcar de ciclo precoce. **Nucleus**, Philadelphia, v.8, p. 375-384, 2011.

TEIXEIRA FILHO, M. C. M. **Doses, fontes e modos de aplicação de zinco na cultura da cana-de-açúcar.** 2011. 155 f. Tese (Doutorado em Sistemas de produção) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira-SP, 2011.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Method 3050b:** acid digestion of sediments, sludges, and soils. Revision 2. Washington: USEPA, 1996. 12p. Disponível em: < <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>>. >. Acessado em: 21 de março de 2017.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Method 3051a:** Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. 1998. Revision 1, Washington: USEPA 2007. 30p. Disponível em: < <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3051a.pdf>>. Acessado em: 26 de Abril de 2016.

VENDRAME, P. R. S.; BRITO, O. R.; QUANTIN, C.; BECQUER, T. Disponibilidade de cobre, ferro, manganês e zinco em solos sob pastagens na Região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v. 42, n.6, p.859-864, 2007.

WANG, J. J; KENNEDY, C. W; VIATOR, H. P; ARCENEUX, A. E; GUIDRY, A. J. Zinc fertilization of sugarcane in acid and calcareous soils. **Journal American Society Sugar Cane Technologists**, Baton Rouge, v. 25, p. 1-13, 2005.

WEI, X.; HAO, M.; SHAO, M.; GALE, W. J. Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, p. 120-130, 2006.

XAVIER, L. F. S.; BIGATON, A.; DANELON, A. F.; SILVA, H. J. T.; MARQUES, P. V. Projeções de Custos e Rentabilidade do Setor Sucroenergético na Região Nordeste para a Safra 2015/16. **Revista iPecege**, Piracicaba, v. 2, p. 100-110, 2016.