



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**JOHNSTON SILVA VIEIRA**

**DISPONIBILIDADE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE COBRE,  
FERRO, MANGANÊS E ZINCO NOS SOLOS DO SERTÃO CENTRAL  
DO CEARÁ.**

**Teresina**

**2016**

**JOHNSTON SILVA VIEIRA**

**DISPONIBILIDADE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE COBRE,  
FERRO, MANGANÊS E ZINCO NOS SOLOS DO SERTÃO CENTRAL  
DO CEARÁ.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia - PPGA, da Universidade Federal do Piauí como requisito para a aprovação no Curso de Mestrado em Agronomia.

Área de Concentração: Manejo e conservação do solo e da água.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Souza Valladares

Co-orientadora: Prof. Dra. Mara Lúcia Jacinto Oliveira

**Teresina**

**2016**

FICHA CATALOGRÁFICA  
Universidade Federal do Piauí  
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Agrárias  
Serviço de Processamento Técnico

**V657d** Vieira,Johnston Silva  
Disponibilidade e variabilidade especial de cobre,ferro,manganês e zinco nos solos do sertão central do Ceará. / Johnston Silva Vieira. - 2016.  
45 f.: il.

Dissertação ( Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Piauí,Teresina,2016.  
Orientação: Prof. Dr. Gustavo Souza Valladares

1 .Micronutrientes 2. Geoestatística 3. Krigagem ordinária 4. Semiárido I. Título

**CDD 631.8**

**DISPONIBILIDADE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE COBRE, FERRO,  
MANGANÊS E ZINCO NOS SOLOS DO SERTÃO CENTRAL DO CEARÁ**

**JOHNSTON SILVA VIEIRA**

Engenheiro Agrônomo

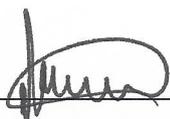
Aprovada em 31/05/2016

Comissão Julgadora:



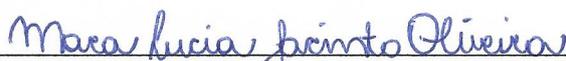
Prof. Dr. Gustavo Souza Valladares – Presidente

CCHL/UFPI



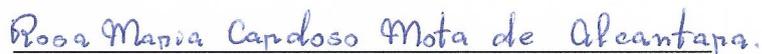
Prof. Dr. Ademir Sergio Ferreira de Araújo – Titular

CCA/UFPI



Profa. Dra. Mara Lúcia Jacinto Oliveira – Titular

CCA/UFPI



Dra. Rosa Maria Cardoso Mota de Alcântara – Titular

Embrapa Meio-Norte

“Tenha fé em Deus,  
Tenha fé na vida,  
Tente outra vez”

(Raul Seixas)

Aos meus pais;  
aos meus irmãos!

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida, pela sabedoria que me foi concedida e por todas as oportunidades que colocou em minha vida.

Aos meus pais, Francisco O. Vieira e Zilda, a quem tenho toda gratidão, pela educação, ensinamentos, por estarem presentes em todos os momentos e me apoiarem em tudo.

Aos meus irmãos, Jackson e Matheus pelo apoio.

Aos meus padrinhos, Manoel e Regina, por terem me acolhido várias vezes em sua residência nos finais de semana me proporcionando um ambiente familiar longe de casa.

Aos meus amigos do Grupo de oração universitário Mãe de Deus que me proporcionaram ficar um pouco mais próximo do caminho certo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gustavo Valladares, pela confiança, paciência e todos os ensinamentos nessa breve e árdua jornada; meu muitíssimo obrigado.

A minha co-orientadora, Prof. Dr. Mara Lúcia, pela paciência, ensinamentos, incentivo à pesquisa e pela contribuição na realização de mais uma conquista; meu muitíssimo obrigado.

Aos meus caríssimos companheiros de mestrado: Arthur, Maristela, Nilza, Valdeci, Bruno Bittercount e Vanusa; agradeço pelo apoio e ajuda em momentos difíceis.

Aos meus caríssimos companheiros do laboratório de geomática: Roneide, Jéssica Frota, João Victor, Jefferson, Nataniel e Herbert; obrigado pelo apoio e imensa ajuda no Arc Gis.

Aos meus amigos, Ângelo, Lana Fabiana, Hortência, Ezequiel, Edineudo, Rodolfo, Mayara Félix, Mayara Sales, Marina Duarte, Hugo, Elivelton, Thaynara, Thaynan e Wiarlley; obrigado pela amizade, companheirismo, lealdade, conselhos ou até boas risadas.

Aos muitos caroneiros que encurtaram a distância entre minhas casas, pois proporcionaram uma boa viagem em ótimas companhias.

## RESUMO

Os micronutrientes são importantes para uma produção agrícola adequada. Logo, o conhecimento dos teores no solo e sua variabilidade espacial é de suma importância para o manejo correto. O objetivo do trabalho foi levantar e mapear os teores dos micronutrientes (cobre, ferro, manganês e zinco) em solos do Sertão do Ceará. A área estudada está localizada no Sertão Central do Ceará, na bacia do Rio Banabuiú englobando os municípios de Pedra Branca, Senador Pompeu, Mombaça e Piquet Carneiro. Foram coletadas amostras e espacializados os pontos dos principais tipos de solo da região. Foram feitas análises de granulometria e químicas, além da determinação dos teores dos micronutrientes nos solos. Com os dados foi realizado a análise descritiva, ajustados os semivariogramas e os mapas de variabilidade espacial. Há uma alta variabilidade dos teores para cada nutriente na área estudada. Os micronutrientes correlacionam-se com os atributos estudados nos solos. Os micronutrientes apresentaram maiores correlações entre si nas camadas subsuperficiais. A análise variográfica demonstrou que estes micronutrientes são estruturados espacialmente, ou seja, apresentam dependência espacial. Os modelos, gaussiano e exponencial, indicaram predominância sobre os outros modelos testados. Na maior parte da área estudada predominam os teores médios para Cu e teores altos para Fe, Mn e Zn em ambas as camadas.

**Palavras-chaves:** Micronutrientes, geoestatística, krigagem ordinária, semiárido.

## **ABSTRACT**

Micronutrients are important for an adequate agricultural production. Therefore, knowledge of the levels in the soil and its spatial variability is very important for the correct handling. The objective was to identify and map the levels of micronutrients (copper, iron, manganese and zinc) in Ceará Hinterland soils. The area studied is located in Ceará Central Hinterland, in the basin of Rio Banabuiú encompassing the municipalities of Pedra Branca, Senador Pompeu, Mombasa and Piquet Carneiro. Samples were collected and spatialized points of the main soil types of the region. particle size and chemical analysis were made, in addition to determining the levels of micronutrients in the soil. Using the data was carried out a descriptive analysis, adjusted the semivariogram and the spatial variability maps. There is a high variability of levels for each nutrient in the study area. Micronutrients are correlated with the attributes studied in soils. Micronutrients had higher correlations with each other in the subsurface layers. The variogram analysis showed that these micronutrients are spatially structured, in other words, have spatial dependence. The Gaussian and exponential models indicated predominance over the other models tested. In most of the study area dominated by average levels for Cu and high levels for Fe, Mn and Zn in both layers.

**Keywords:** Micronutrients, geostatistics, ordinary kriging, semiarid.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Mapa da área de estudo.....	20
Figura 2- Mapas de solo da área de estudo.....	21
Quadro 1- Descrição das unidades de mapeamento de solo .....	22
Figura 3- Mapa com os pontos amostrados .....	23
Figura 4- Semivariogramas dos micronutrientes com os teores dos solos do Sertão central do Ceará .....	36
Figura 5- Distribuição espacial dos teores de micronutrientes nas camadas superficiais e subsuperficiais .....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classes de interpretação da disponibilidade para os micronutrientes extraídos pelo método Mehlich-1 .....	24
Tabela 2- Análise descritiva dos dados químicos e granulométricos do solo .....	25
Tabela 3- Teores de micronutrientes nas camadas superficiais e subsuperficiais .....	28
Tabela 4- Distribuição de frequência dos micronutrientes nas camadas superficiais e subsuperficiais .....	30
Tabela 5- Correlação de Pearson entre os micronutrientes e os atributos nas camadas superficiais e subsuperficiais .....	32
Tabela 6- Modelos de semivariogramas ajustados para atributos em ambas as camadas .....	35

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	13
2.1 MICRONUTRIENTES .....	13
2.1.1 Cobre .....	14
2.1.2 Ferro .....	15
2.1.3 Manganês.....	16
2.1.4 Zinco.....	17
2.2 VARIABILIDADE ESPACIAL DE MICRONUTRIENTES NOS SOLOS.....	18
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	19
3.1 ÁREA DE ESTUDO .....	19
3.2 COLETA E ANÁLISES DE DADOS .....	22
3.2.1 Determinações granulométricas e químicas .....	24
3.2.3 Estatísticas .....	24
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	28
4.1 ANÁLISES DESCRITIVAS DOS MICRONUTRIENTES DISPONÍVEIS NO SOLO ..	28
4.2 CORRELAÇÕES .....	31
4.3 ANÁLISES GEOESTATÍSTICAS DOS MICRONUTRIENTES DISPONÍVEIS NO SOLO.....	34
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	40
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	41

## 1 INTRODUÇÃO

O nordeste brasileiro é composto de diversas paisagens: zona da mata, meio norte, agreste e sertão. Cada uma contém suas peculiaridades e devem ser manejadas de maneira correta sabendo explorar suas potencialidades e contornando suas adversidades. O sertão constitui o ambiente predominante desta região brasileira, assim como do Estado do Ceará.

A caatinga é um domínio ecogeográfico que engloba vários aspectos que o definem como a vegetação característica, climáticos, geográficos e pedológicos que somados fornecem ao domínio suas características peculiares, sendo o principal bioma do Ceará, onde geralmente reside a população de baixa renda (GUIMARÃES, 2013). As principais atividades agrícolas desenvolvidas nesse bioma são a pecuária, agricultura de subsistência e extrativismo vegetal, geralmente realizadas com baixo nível tecnológico fazendo com que ocorra a degradação dos seus recursos naturais ou baixa produtividade das culturas (AQUINO, 2013).

A baixa produtividade das culturas em sistemas de agricultura de baixa renda pode estar associada com a falta do conhecimento da fertilidade do solo. O conhecimento da fertilidade dos solos é fundamental para que as atividades agrícolas atinjam boas produtividades, porém nem sempre é possível a obtenção de dados químicos dos solos daquela região para melhor manejo, devido aos elevados custos para obtenção de análises. Geralmente em análises de solo, somente são determinados os macronutrientes, em detrimento dos micronutrientes os quais também são elementos essenciais, fundamentais para uma recomendação de adubação adequada, no qual evitaria problemas de deficiência ou de toxidez.

Os micronutrientes apesar de serem exigidos em menores quantidades em relação aos macronutrientes, ambos são essenciais ao desenvolvimento da planta e/ou cultura. Sem esses micronutrientes a planta não completa o seu ciclo e também não podem ser substituídos por nutriente.

Alguns desses micronutrientes como o cobre (Cu) e o zinco (Zn) podem ser chamados de elementos traços que são elementos químicos relativamente estáveis, não degradáveis e com densidade maior que quatro, apresentando elevado caráter tóxico dependendo da concentração. A concentração desses nutrientes no solo pode estar ligada a dois fatores: o material de origem ou o aporte vindo de contribuições antropogênicas. O Fe e o Mn apesar de serem considerados metais pesados não são monitorados pelos órgãos ambientais.

O estudo da variabilidade dos atributos dos solos vem despertando interesse de muitos pesquisadores e estudiosos com várias aplicações na ciência do solo. Permitindo assim o conhecimento do comportamento espacial de determinado atributo em estudo o que irá contribuir no manejo que venha a ser aplicado. Contudo, a região de trabalho não há estudos sobre micronutrientes e muito menos sobre a variabilidade desses.

As hipóteses do presente deste trabalho são: os solos do Sertão Central do Ceará apresentam baixos teores de Cu, Fe, Mn e Zn; atributos químicos e físicos dos solos interferem na disponibilidade dos micronutrientes estudados Cu, Fe, Mn e Zn; e que há dependência espacial dos teores de micronutrientes nos solos do Sertão Central do Ceará.

Diante do exposto, o objetivo geral foi levantar e mapear os teores dos micronutrientes (cobre, ferro, manganês e zinco) em solos do Sertão do Ceará. Os objetivos específicos foram: determinar os teores disponíveis de micronutrientes no solo; avaliar atributos do solo que tenham relação com os micronutrientes; avaliar por Krigagem ordinária a dependência espacial dos teores dos micronutrientes; verificar a distribuição espacial dos teores dos micronutrientes.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 MICRONUTRIENTES

Os elementos essenciais às plantas, absorvidos em pequenas quantidades são denominados micronutrientes (PEREIRA et al., 2001). Os micronutrientes nos solos são identificados em diversas formas, ora como íons trocáveis, ora em compostos minerais e/ou orgânicos, cuja solubilidade depende do pH do solo (ROCHA, 1995). Os compostos de cobre, ferro, manganês e zinco são solúveis em meio ácido. De acordo com Kabata-pendias (2004) o potencial de oxidação e redução também interfere na solubilidade desses elementos. Os micronutrientes catiônicos (Cu, Fe, Mn e Zn) ocorrem nos solos principalmente na forma divalente (ABREU, 2007).

O solo é a principal fonte desses elementos para as plantas. O conhecimento do material de origem, processos pedogenéticos, distribuição nas camadas e suas correlações com os outros atributos é de suma importância para o manejo do solo. (KABATA-PENDIAS, 2004; CAMPOS, 2010; HUGEN et al., 2013). Solos originados de rochas básicas, naturalmente são mais ricos em micronutrientes, quando comparados com aqueles formados sobre granitos, gnaisses, arenitos e siltitos (FADIGAS et al., 2002). Resende et al. (2007) afirmam que rochas máficas podem ser mais ricas em Cu, Fe e Zn.

De acordo com Vig et al. (2003), a biodisponibilidade dos micronutrientes é influenciada por vários fatores: tipo de solo e os atributos químicos, especiação química e concentração; pH do solo; intemperismo; fonte do elemento e natureza dos microrganismos. Estes micronutrientes sofrem forte influência de pH, sendo mais móveis em condições de pH baixo, ou seja, solos mais ácidos, principalmente solos com elevado grau de intemperização (CAMPOS, 2010). Entretanto valores de pH acima de 6 contribuem para a dissociação de  $H^+$  de grupos  $OH^-$  da matéria orgânica e dos óxidos de Al e Fe, aumentando a adsorção dos metais e subsequente precipitação (OLIVEIRA et al., 2002), reduzindo a sua biodisponibilidade.

Os micronutrientes podem ser encontrados no solo tanto complexados com a parte orgânica como na forma inorgânica (CAMARGO, 2006). A matéria orgânica, em função, particularmente de sua configuração e abundância de grupos fenólicos e carboxílicos, apresenta elevada afinidade por micronutrientes presentes no solo (CAMPOS, 2010). Segundo Walker et al. (2004) o comportamento da matéria orgânica do solo em relação aos micronutrientes depende de características de tamanho molecular, massa molar, estrutura e características de

solubilidade. A natureza do colóide, os grupos funcionais em suas superfícies determinam uma maior ou menor adsorção dos micronutrientes em virtude das unidades funcionais carboxílicas e fenólicas que, frequentemente, formam estruturas com cargas negativas (CALA et al., 2005). Os micronutrientes da solução do solo podem ser complexados pela existência de grupos funcionais da matéria orgânica.

### 2.1.1 Cobre

Os valores totais encontrados nos solos variam de 10 a 80 mg kg<sup>-1</sup>, na forma divalente (Cu<sup>2+</sup>) sendo esta a principal no qual também é absorvido pelas plantas junto com Cu-quelato (DECHEN & NACHTIGALL, 2007). O elemento é encontrado principalmente em estruturas cristalinas, minerais primários e secundários. Em relação ao material de origem, as rochas ígneas básicas são ricas em cobre, entretanto nas rochas sedimentares são nos folhelhos que se verifica as maiores concentrações (ABREU et al., 2007).

Pereira et al. (2001) determinando os teores de Cu extraídos com Mehlich-1 para os solos representativos do estado do Rio de Janeiro encontraram teores variando de 0,03 a 25,80 mg kg<sup>-1</sup>, também constataram que a maioria dos dados de acordo Alvarez et al. (1999) se encontram em níveis baixos. Hugen et al. (2013) analisando solos de Santa Catarina verificou maiores teores desse micronutriente em solos derivados de rochas máficas, e em solos arenosos derivados de sedimentos foi encontrado baixos teores de Cu. Chaves e Farias (2009) estudando argissolos sob cultivo de cana-de-açúcar encontraram teores entre 0,42 a 3,16 mg kg<sup>-1</sup>, com média de 0,81 mg kg<sup>-1</sup>, apresentou também maior parte dos seus valores classificados nas classes média e alta.

Sua maior disponibilidade ocorre na faixa de pH 5,0 – 6,5 (ABREU et al., 2007). Biondi et al. (2011) em solos de referência do estado de Pernambuco encontrou correlação nos solos geralmente apresentam correlação positiva com a argila. O Cu é retido na argila forma trocável, disponível para as plantas. Entretanto os solos arenosos tendem a serem mais deficientes em Cu. O Cu se correlaciona diretamente com a argila, pH e matéria orgânica (BIONDI et al., 2011; SANTOS & ALLEONI, 2013). O Cu é fortemente retido na fase sólida dos solos (CAMARGO, 2006).

A deficiência deste micronutriente é verificada em solos orgânicos, mesmo que estes apresentem altos teores, o Cu forma complexos estáveis com a matéria orgânica, fazendo com que apenas pequena parte da fração fique disponível as plantas ou em solos arenosos, cujos

baixos teores de matéria orgânica, provocam a deficiência em função da lixiviação deste micronutriente (ABREU et al., 2007). O cobre é também considerado um metal pesado que é regulado pelo CONAMA (2009) cujos valores orientadores de prevenção são  $60 \text{ mg kg}^{-1}$  e de investigação em áreas agrícolas correspondem a  $200 \text{ mg kg}^{-1}$ .

### 2.1.2 Ferro

O ferro é o segundo metal em abundância depois alumínio e o quarto elemento depois de oxigênio e silício, constituindo aproximadamente 5 % da crosta terrestre. O Fe é o micronutriente encontrado em maior concentração, especialmente nas rochas ígneas básicas (95% da crosta terrestre), pois o mesmo, por ter baixa lixiviação, é um importante constituinte de alguns minerais do solo, principalmente nos mais intemperizados, pois com o intemperismo, os óxidos e hidróxidos de ferro acumulam-se no perfil (SILVA, 2009).

O Fe é um importante indicador geoquímico estando relacionado aos outros micronutrientes e alguns metais pesados (BIONDI et al., 2011). Entretanto, solos onde se verificam baixas concentrações de Fe, em condições de clima úmido, apresenta baixa concentrações de outros micronutrientes em virtude da lixiviação (SOUZA et al., 2015). Alguns autores encontraram correlações do Fe com os micronutrientes Cu, Mn e Zn (BIONDI et al., 2011; BIRANI et al., 2015).

Pereira et al. (2001) determinando os teores de Fe extraídos com Mehlich-1 para os solos representativos do estado do Rio de Janeiro encontraram teores variando de 4,47 a 436,22  $\text{mg kg}^{-1}$ , também observaram os dados de acordo Alvarez et al. (1999) se apresentaram de forma distributiva nas 3 classes: baixa, média e alta. Gontijo et al. (2012) em uma área de produção de Pimenta-do-reino sobre um Latossolo vermelho-amarelo, no município de São Matheus-ES, encontraram teores variando de 27,30 a 204,60  $\text{mg kg}^{-1}$ .

Na maioria dos solos cultivados os teores de Fe são baixos, tanto na solução do solo como adsorvido em forma trocável. A maior disponibilidade do Fe é verificada entre pH 4,0 a 6,0. Sua deficiência é causada em boa parte dos casos, pelo desequilíbrio em relação a outros micronutrientes, como por exemplo: Cu, Mn e Zn, ou então o excesso de P nos solos (ABREU et al., 2007).

A disponibilidade de ferro é influenciada principalmente pelos teores de argila e matéria orgânica. Há uma predisposição de retenção de Fe em solos argilosos, ao mesmo tempo que quantidades satisfatórias de matéria orgânica propicia melhor aproveitamento do Fe pelos

vegetais. Devido as suas propriedades acidificantes e redutoras, a matéria orgânica, da mesma maneira que a capacidade de algumas substâncias húmicas, têm a capacidade para formar quelatos em condições adversas de pH (DECHEN & NACHTIGALL, 2007). Os solos ricos em matéria orgânica são aqueles mais provavelmente pobres em Fe e onde as deficiências são bastante comuns, particularmente quando encharcados.

### 2.1.3 Manganês

O manganês é o décimo primeiro elemento mais abundante da natureza no qual apresenta um teor na crosta terrestre em torno de  $900 \text{ mg kg}^{-1}$ . As principais formas encontradas nos solos são os óxidos e sulfetos de Mn, sendo normal sua ocorrência junto com o Fe. Nos solos podem apresentar valências 2, 3 e 4. Na solução do solo e na forma trocável está principalmente como  $\text{Mn}^{2+}$ , do mesmo modo que o  $\text{Mn}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{4+}$  formam óxidos geralmente insolúveis. O Manganês na forma  $\text{Mn}^{2+}$  é absorvido pelas plantas. A forma  $\text{Mn}^{4+}$  não é absorvido e o  $\text{Mn}^{3+}$  é desconhecido seu processo de absorção. (DECHEN & NACHTIGALL, 2007). São nas rochas basálticas que são verificados os maiores teores de Mn (SILVA, 2009).

Pereira et al. (2001) determinando os teores de Mn extraídos com Mehlich-1 para os solos representativos do estado do Rio de Janeiro encontraram teores variando de 0,24 a 185,13  $\text{mg kg}^{-1}$ , também observaram os dados de acordo Alvarez et al. (1999) se apresentaram maior parte dos valores classificados como altos. Chaves e Farias (2009) estudando argissolos sob cultivo de cana-de-açúcar encontraram teores de Mn entre 0,16 a 5,39  $\text{mg kg}^{-1}$ , com média de 1,13  $\text{mg kg}^{-1}$ , apresentou também maior parte dos seus valores classificado na classe baixa.

A deficiência de manganês é verificada em solos frios, úmidos e ricos em matéria orgânica. Os sintomas desaparecem à medida que o solo seca e as temperaturas aumentam. Esta condição pode ser relacionada à menor atividade microbológica nos solos frios e úmidos.

Na faixa de pH de 5,0 a 6,5 ocorre a maior disponibilidade do Mn. Assim como o Cu, o Mn apresenta deficiência desse micronutriente em solos orgânicos devido a complexos estáveis entre a matéria orgânica e este (ABREU et al., 2007). Há correlações entre o Mn com argila em solos (FADIGAS et al., 2010; BIONDI et al., 2011). Assim como o Fe, é um importante micronutriente em estudos geoquímicos que se correlaciona com outros micronutrientes (BIONDI, et al. 2011). Este micronutriente aparece nas rochas ígneas fazendo parte da estrutura dos silicatos, numa proporção Mn:Fe de 1:60. O Mn é mais abundante nos basaltos que nos granitos (CAMARGO, 2006).

#### 2.1.4 Zinco

Os teores de Zn nos solos variam de 10 a 300 mg kg<sup>-1</sup> de Zn total, nas rochas ígneas varia de 40 mg kg<sup>-1</sup> (granito) a 130 mg kg<sup>-1</sup> (basalto) e nas rochas sedimentares vai de 16 mg kg<sup>-1</sup> (arenito) a 96 mg kg<sup>-1</sup> (folhelho) (DECHEN & NACHTIGALL, 2007). O principal mineral de Zn é a esfarelita (ZnS), mas ele pode ocorrer como carbonato de Zn (ZnCO<sub>3</sub>). De acordo com Silva (2009) o baixo teor de Zn verificados em arenitos e granitos, é um dos principais motivos do surgimento de deficiência em grandes áreas do Brasil (SILVA, 2009).

A maior disponibilidade deste micronutriente encontra-se na faixa de pH 5,0 a 6,5 (ABREU et al., 2007), porém outros autores afirmam que este micronutriente apresenta maior disponibilidade em solos ácidos (NATHHTIGAL et al. 2009; SOUZA et al. 2010). A aplicação de corretivos para elevar o pH acima de 6,0 pode provocar deficiência, especialmente quando o solo for arenoso ou quando ocorre altas doses de adubações fosfatadas (ABREU et al., 2007). O Zn, assim como o Cu, é um micronutriente fortemente retido na fase sólida dos solos (CAMARGO, 2006).

Pereira et al. (2001) determinando os teores de Zn extraídos com Mehlich-1 para os solos representativos do estado do Rio de Janeiro encontraram teores variando de 0,14 a 12,69 mg kg<sup>-1</sup>, também observaram os dados de acordo Alvarez et al. (1999) se apresentaram maior parte dos valores classificados como altos. Gontijo et al. (2012) em uma área de produção de Pimenta-do-reino sobre um Latossolo vermelho-amarelo, no município de São Matheus-ES, encontraram teores de Zn variando de 0,2 a 3,7 mg kg<sup>-1</sup>.

Vendrame et al. (2007) estudando a disponibilidade de micronutrientes em solos do Cerrado sob pastagem, observaram que 33 % das amostras para o Zn foram classificadas como altas. Assim como o Cu, o Zn também é considerado um metal pesado quando atinge níveis tóxicos no solo CONAMA (2009) cujos os valores são de referência 300 mg kg<sup>-1</sup> de prevenção e 450 mg kg<sup>-1</sup> investigação pra áreas agrícolas.

## 2.2 VARIABILIDADE ESPACIAL DE MICRONUTRIENTES NOS SOLOS

O solo é a principal fonte de micronutrientes. A disponibilidade desses é influenciado por vários fatores ao longo dos perfis e das áreas onde se encontram. E a utilização de variáveis como média e coeficientes de variação, baseados na estatística clássica, são ineficientes para um estudo de um determinado atributo em uma área com manchas homogêneas de solo (COUTO & KLANT, 1999). Sendo, portanto, necessário, a utilização de uma ferramenta capaz de determinar o comportamento de determinado atributo com a mínima variação ao longo de um determinado campo. A geoestatística, com base na teoria variável regional, é um dos métodos mais eficazes para analisar a distribuição espacial das propriedades do solo e seus mecanismos de variação (YE et al., 2015).

A geoestatística é definida como um conjunto de técnicas de modelagem espacial, com levantamento probabilístico, as quais possibilitam mapear superfícies e aferir dados em locais não amostrados levando em conta o comportamento espacial e/ou temporal de um fenômeno, diminuindo o erro desta avaliação (LADO et al., 2008). Após a obtenção do semivariograma e sendo verificado dependência espacial entre as amostras, podem-se interpolar valores em quaisquer posições no campo de estudo, sem tendência e variância mínima (GONTIJO, et al., 2012).

Estudos geoestatísticos com auxílio de semivariogramas experimentais têm comprovado a dependência espacial para micronutrientes no solo ao redor do mundo (DAFONTE et al., 2010; WANI et al., 2012; YE et al., 2015) em pequenas áreas agrícolas no Brasil (COUTO & KLAMT, 1999; CHAVE & FARIAS, 2009; VALLADARES et al., 2009; GONTIJO, et al., 2012) e em áreas abrangendo um estado inteiro (SOUZA et al., 2015; JÚNIOR et al., 2009).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área estudada está localizada no Sertão Central do Ceará, contido na bacia do Rio Banabuiú englobando os municípios de Pedra Branca, Senador Pompeu, Mombaça e Piquet Carneiro que ficam na região de médio Jaguaribe, com extensão de 149.035 hectares Distribui-se de forma descontínua entre as coordenadas UTM 9347590 e 9407637 de latitude e 405338 e 464624 de longitude, zona 24.

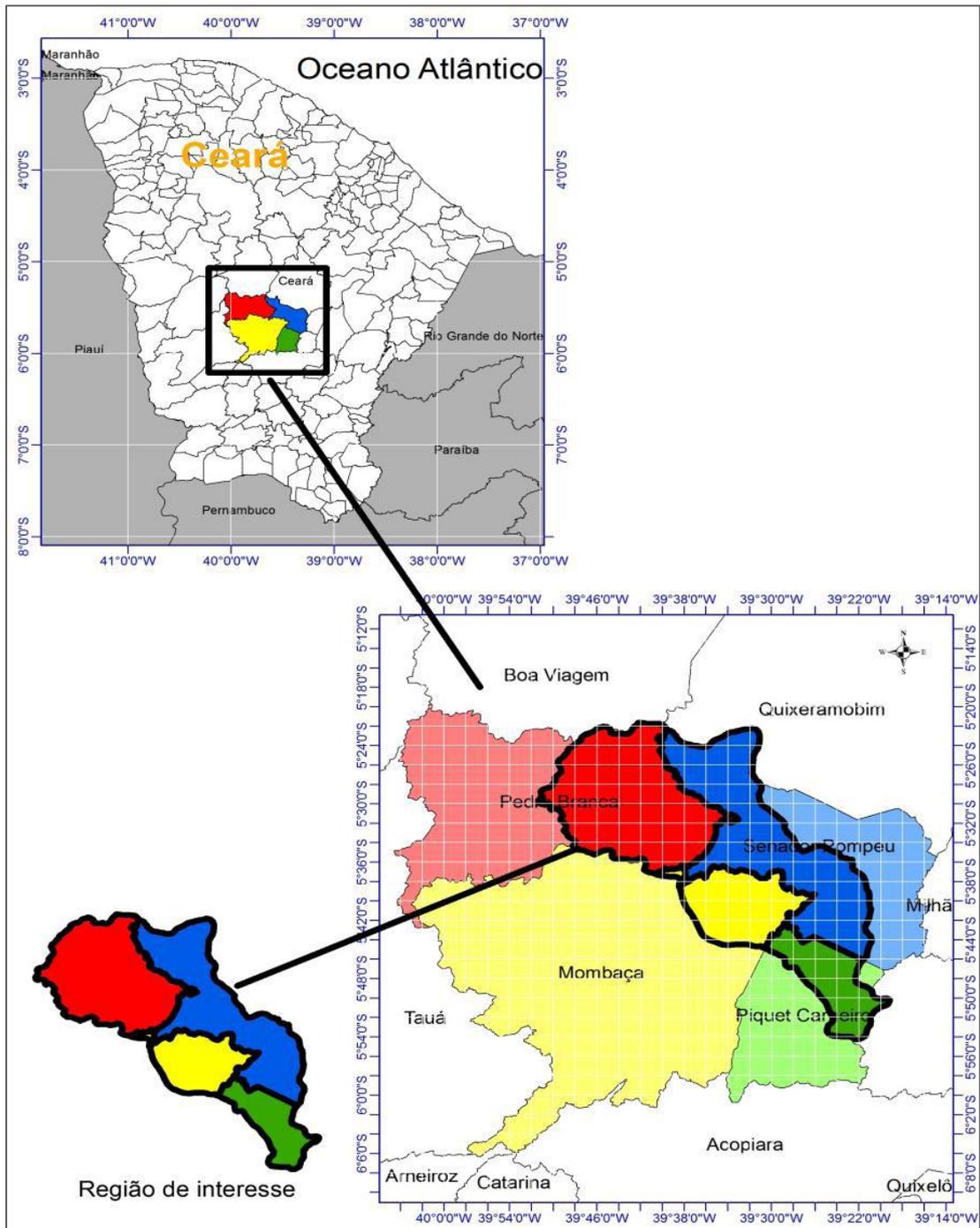
A área estudada apresenta clima tropical quente semiárido (IPECE, 2007) com temperatura média de 25° C e precipitação pluviométrica média de 1087 mm por ano nos quatro municípios concentradas de janeiro a abril (GUIMARÃES, 2013). A pecuária é extensiva (bovinos, caprinos) e a agricultura tradicional, sendo de corte e queima com destaque para o plantio de milho e feijão, são as principais atividades agrícolas praticadas nos quatro municípios (AQUINO, 2013).

De maneira geral, a área de estudo insere-se no domínio das áreas cratônicas brasileiras, que se caracterizam, segundo Ross (2000), por uma grande complexidade litológica, prevalecendo as rochas metamórficas muito antigas (Pré-Cambriano Médio a Inferior, com 2 a 4,5 bilhões de anos). Também ocorrem rochas intrusivas antigas (Pré-Cambriano Médio a Superior, com 1 a 2 bilhões de anos e resíduos de rochas sedimentares datadas do Pré-Cambriano Superior, que em alguma fase da história da Terra encobriam partes das plataformas.

Os compartimentos geomorfológicos presentes nessa região são o Planalto Sertanejo e a Depressão Sertaneja (IBGE, 1999). As altitudes variam 200 a 800 m. Cerca de 60% da área em estudo apresenta declividade plana a suavemente ondulada. Os solos presentes na área de estudo são classificados como: cambissolos, chernossolos, argissolos, neossolos, planossolos, luvisolos e vertissolos (GUIMARÃES, 2013).

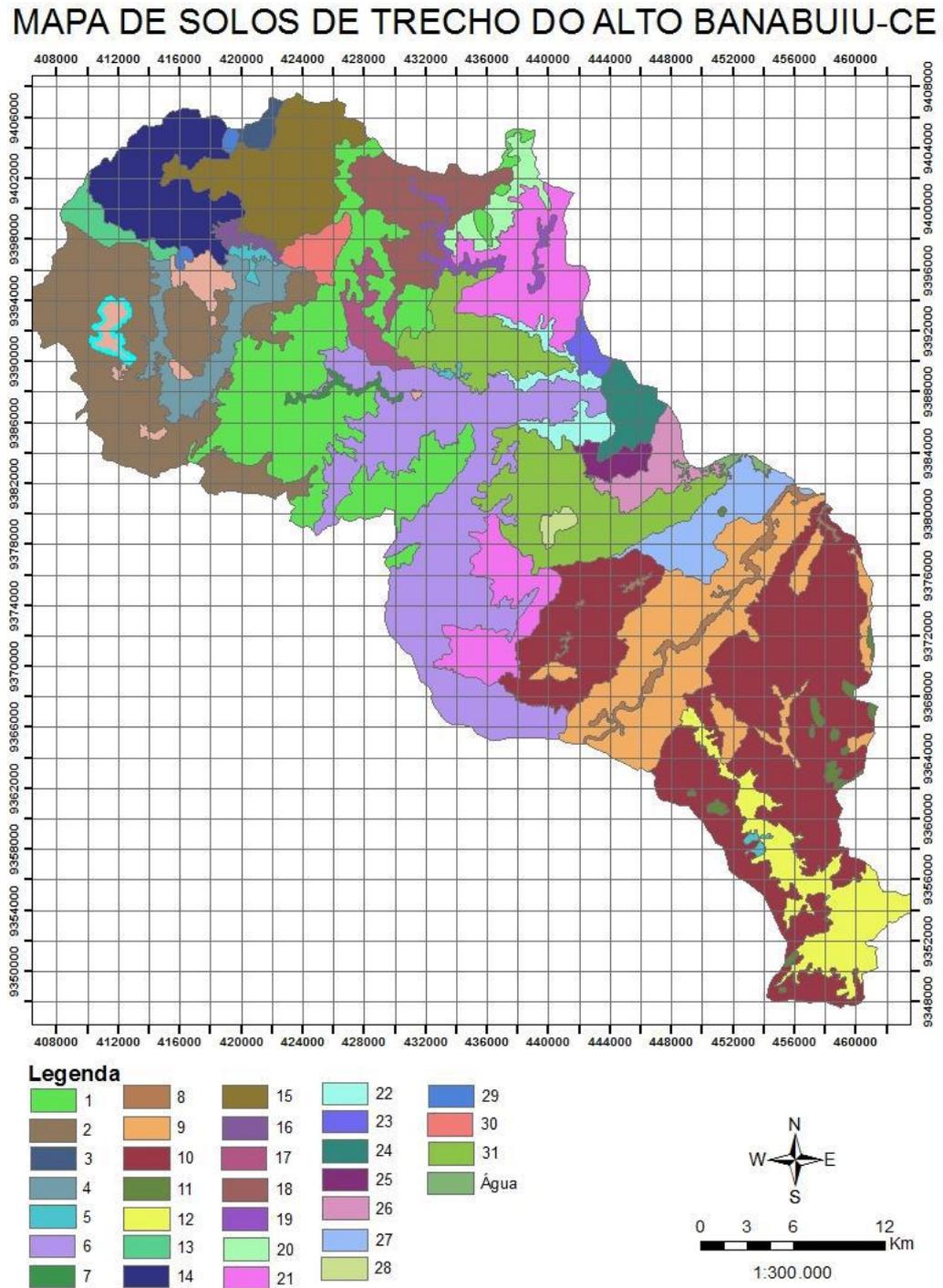
De acordo com Guimarães (2013), 62% da área estudada é composta por Caatinga arbustiva densa e aberta, 26% é formada por pastagem o que mostra uma importância muito grande dessa atividade na região, o que acaba exercendo uma pressão muito grande sobre os recursos naturais dado que esse sistema é manejado dessa forma e os 12% engloba áreas urbanas, corpos hídricos, vegetação ripária entre outros.

Figura 1. Mapa da área de estudo



Fonte: Guimarães, 2013.

Figura 2. Mapa de solos da área de estudo



Fonte: Aquino, 2013.

As unidades de mapeamento de solos encontram-se descritas no quadro 01.

Quadro 01: Descrição das unidades de mapeamento de solo

Unidade de Mapeamento	Componente(s)
1	Complexo de NEOSSOLO LITÓLICO, CAMBISSOLO HÁPLICO e ARGISSOLO VERMELHO.
2	ARGISSOLO VERMELHO
3	Complexo de NEOSSOLO LITÓLICO e CAMBISSOLO HÁPLICO.
4	Associação de CHERNOSSOLO ARGILÚVICO e CHERNOSSOLO HÁPLICO.
5	Área Urbana
6	ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico típico e abrupto, A moderado, textura média e média/argilosa.
7	Grupamento indiscriminado de CHERNOSSOLO EBÂNICO e CAMBISSOLO FLÚVICO.
8	NEOSSOLO FLÚVICO
9	Associação de NEOSSOLO LITÓLICO e NEOSSOLO REGOLÍTICO.
10	Complexo de ARGISSOLO VERMELHO, PLANOSSOLO NÁTRICO e NEOSSOLO LITÓLICO.
11	NEOSSOLOS LITÓLICOS.
12	Associação de CAMBISSOLO HÁPLICO e PLANOSSOLO HÁPLICO.
13	Associação de ARGISSOLO AMARELO, VERMELHO-AMARELO e CHERNOSSOLO ARGILÚVICO.
14	Associação de NEOSSOLO LITÓLICO, NEOSSOLO REGOLÍTICO e CAMBISSOLO HÁPLICO.
15	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO e VERMELHO.
16	Associação de ARGISSOLO VERMELHO e NEOSSOLO FLÚVICO.
17	Associação de CHERNOSSOLO ARGILÚVICO Órtico léptico e saprolítico + CHERNOSSOLO HÁPLICO Órtico léptico e típico, ambos textura média/argilosa
18	Associação de NEOSSOLO LITÓLICO e NEOSSOLO REGOLÍTICO.
19	NEOSSOLO FLÚVICO.
20	Associação de ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO, CHERNOSSOLO ARGILÚVICO e HÁPLICO.
21	Associação de ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO e PLANOSSOLO HÁPLICO.
22	Associação de PLANOSSOLO HÁPLICO e ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO.
23	Associação de ARGISSOLO VERMELHO Distrófico e Eutrófico abrupto e típico, textura média/argilosa + NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico, ambos A moderado
24	Associação de PLANOSSOLO HÁPLICO e LUVISSOLO CRÔMICO.
25	Associação de VERTISSOLO HÁPLICO e LUVISSOLO CRÔMICO.
26	Complexo de LUVISSOLO CRÔMICO, NEOSSOLO LITÓLICO e NEOSSOLO LITÓLICO.
27	Associação de ARGISSOLO VERMELHO e PLANOSSOLO HÁPLICO.
28	NEOSSOLO REGOLÍTICO.
29	NEOSSOLO LITÓLICO.
30	Associação de CAMBISSOLO HÁPLICO e NEOSSOLO LITÓLICO.
31	Associação de ARGISSOLO VERMELHO e NEOSSOLO LITÓLICO.

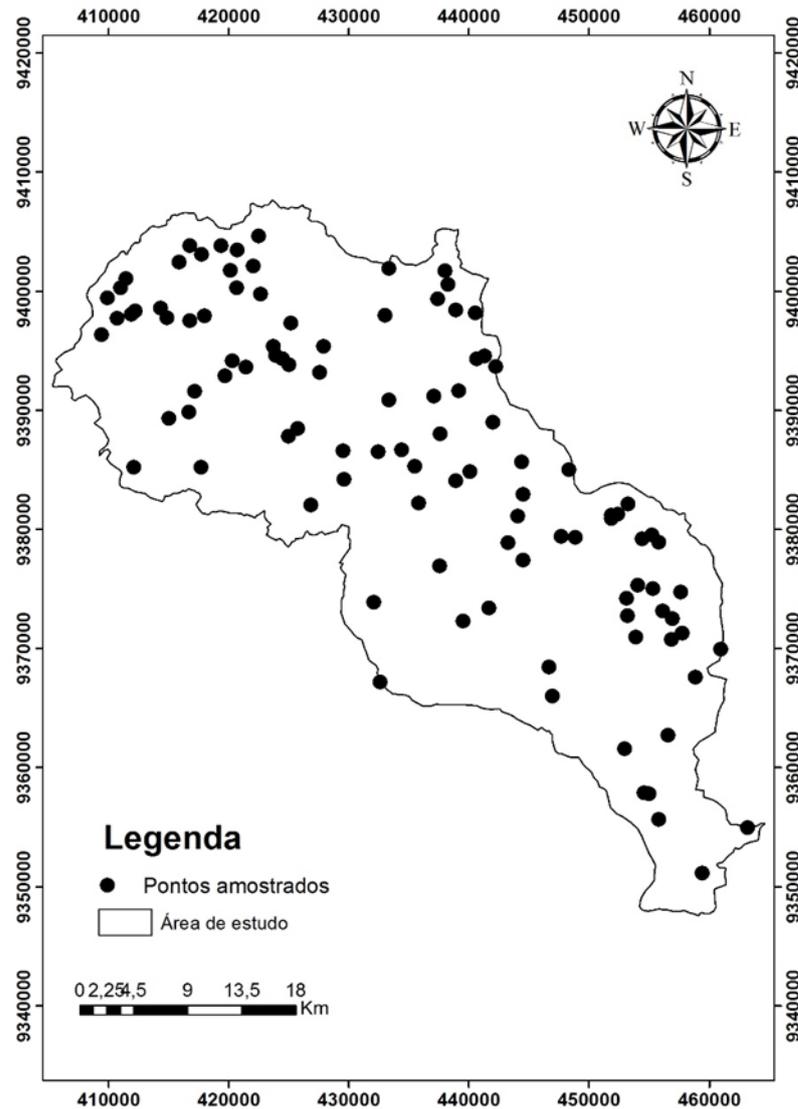
Fonte: Aquino, 2013.

### 3.2 COLETA E ANÁLISES DE DADOS

Foram identificados pontos de interesse com base em estudos antes da coleta com o uso de imagem de morfometria, formada por uma composição falsa cor contendo altimetria,

declividade e curvatura do terreno, com o objetivo de caracterização morfológica e classificação de perfis de solos totalizados 222 amostras (superficiais e subsuperficiais) não espaçadas uniformemente sendo considerado uma grade irregular, bem como a coleta de amostras para análises físicas e químicas (AQUINO, 2013). Os pontos amostrados se encontram na figura 3.

Figura 3. Mapa com os pontos amostrados.



Fonte: Johnston Silva Vieira (2015).

De acordo com Aquino (2013) para caracterização morfológica dos perfis, foram utilizadas fichas de descrição de solos, nas quais constam informações gerais da área de coleta, (coordenadas geográficas, geologia, relevo local, relevo regional, declividades, vegetação, uso do solo), bem como a descrição das principais características morfológicas, tais como cor, textura, estrutura, espessura dos horizontes, consistência, cerosidade, presença de raízes etc.),

conforme SANTOS et al (2005) e classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos solos (SiBCS – EMBRAPA, 2006).

### 3.2.1 Determinações granulométricas e químicas

As amostras coletadas foram analisadas nos laboratórios de solos da UFC e UFV. Foram realizadas as seguintes análises granulométricas (areia, silte e argila) e químicas: pH em água,  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$ , Soma de bases,  $\text{Al}^{+3}$ , P,  $\text{K}^{+}$ , CTC, V%, P e carbono orgânico de acordo com EMBRAPA (1997). Os micronutrientes foram extraídos por Solução de HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup> (Mehlich-1): 10 g de solo e 50 mL de solução extratora, cinco minutos de agitação e dezesseis horas de repouso. Em seguida, o material foi filtrado e, no extrato, determinados os micronutrientes (NELSON et al., 1953). Logo em seguida foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica.

A disponibilidade dos micronutrientes foi avaliada pela classificação proposta por Alvarez et al. (1999) para o estado de Minas Gerais extraídas por Mehlich-1, adaptada apenas para 3 classes para a melhor compreensão: baixo, média e alta (Tabela 1).

Tabela 1. Classes de interpretação da disponibilidade para os micronutrientes extraídos pelo método Mehlich-1.

Classe	Teor	Cu	Fe	Mn	Zn
		mg dm <sup>-3</sup>			
Baixo		<0,7	<18	<5	<0,9
Médio		0,8-1,2	19 - 30	6 - 8	1,0 - 1,5
Alto		>1,2	>31	> 9	>1,5

Fonte: Alvarez et al. (1999).

### 3.2.3 Estatísticas

Foram feitas estatísticas descritivas para os atributos químicos, granulometria e para os micronutrientes em estudo a fim de determinar os teores mínimos, médios, mediana, máximos e coeficiente de variação (CV) (Tabela 2). Realizou-se análises de correlação simples de Pearson ( $P < 0,05$ ) entre os atributos químicos e a granulometria do solo e os teores de Cu, Fe, Mn e Zn quantificados no programa estatístico Assistat 7.7.

Tabela 2. Análise descritiva dos dados químicos e granulométricos do solo.

Parâmetros	Média	Valor		DP	CV%
		Min.	Máx.		
Camadas superficiais					
Areia (%)	62,68	17,00	93,00	16,59	26,46
Silte (%)	17,23	3,00	65,00	8,67	50,32
Argila (%)	20,10	4,00	54,00	11,48	57,11
pH	6,16	4,22	7,64	0,60	9,66
P (mg/dm <sup>3</sup> )	20,58	0,20	281,70	48,87	237,43
K (mg/dm <sup>3</sup> )	118,40	22,00	380,00	75,01	63,36
Na (mg/dm <sup>3</sup> )	19,67	1,00	191,50	32,64	165,93
Ca (cmolc/ dm <sup>3</sup> )	4,75	0,53	20,72	3,41	71,81
Mg (cmolc/ dm <sup>3</sup> )	1,49	0,08	13,23	1,79	120,11
Al (cmolc/ dm <sup>3</sup> )	0,03	0,00	0,68	0,11	323,38
SB (cmolc/ dm <sup>3</sup> )	6,66	0,93	34,19	5,07	76,11
CTC (pH 7,0, cmolc/ dm <sup>3</sup> )	50,36	5,54	96,80	26,78	53,18
V %	64,45	23,10	96,80	18,72	29,04
MO (dag/kg)	2,07	0,26	7,17	1,36	65,69
Camadas subsuperficiais					
Areia (%)	53,29	21,00	92,00	18,79	35,26
Silte (%)	15,44	0,00	40,00	7,88	51,02
Argila (%)	31,27	4,00	70,00	16,70	53,42
pH	6,19	4,52	9,94	0,82	13,32
P (mg/dm <sup>3</sup> )	14,45	0,00	230,20	36,63	253,39
K (mg/dm <sup>3</sup> )	83,98	7,00	1220,00	172,11	204,95
Na (cmolc/ dm <sup>3</sup> )	100,23	1,20	2586,80	295,11	294,43
Ca (cmolc/ dm <sup>3</sup> )	4,75	0,28	26,00	4,07	85,71
Mg (cmolc/ dm <sup>3</sup> )	2,73	0,05	27,18	3,84	140,78
Al (cmolc/ dm <sup>3</sup> )	0,13	0,00	3,41	0,36	270,37
SB (cmolc/ dm <sup>3</sup> )	8,25	0,65	43,86	7,56	91,57
CTC (pH 7,0) (cmolc/ dm <sup>3</sup> )	53,35	3,09	98,20	29,61	55,50
V %	68,86	19,80	98,20	20,69	30,05
MO (dag/kg)	0,72	0,13	3,26	0,45	63,26

As amostras foram classificadas quanta a textura com base no teor de argila, de acordo Camargo et al. (2009) como sendo 43,01% (camadas superficiais) e 23,20% (camadas subsuperficiais) de textura arenosa (teor de argila menor do que 15 %), 46,24% e 33,60% de textura média (teor entre 15 e 35%), 10,75% e 39,20% de textura argilosa (teor entre 35 e 60%) e 0 e 4,00% (teor superior a 60%).

As amostras foram classificadas quanto ao pH segundo a classificação agronômica, de acordo com Alvarez et al. (1999), sendo pH muito baixo 1,08% (camadas superficiais) e 0,00% (camadas subsuperficiais) (pH < 4,5); pH baixo 9,68% e 20,00% (4,5 < pH < 5,5); pH bom 30,11% e 22,40% (5,5 < pH < 6,0); pH alto 50,54% e 44,00% (6,0 < pH < 7,0); pH muito alto 8,60% e 13,60% (pH > 7,0).

As amostras foram classificadas quanto a MO, de acordo com Alvarez et al. (1999), sendo classificadas como baixas 61,29% (camadas superficiais) e 98,40% (camadas

subsuperficiais) ( $MO < 2,00$ ); valores médios 30,11% e 1,60% ( $MO$  entre 2 e 4); valores altos 8,60% e 0,00% ( $MO > 4$ ).

A partir da compilação dos dados, foi construído um banco de dados georreferenciados contendo todas as informações necessárias às análises propostas com o auxílio do software de manipulação de informações geográficas ArcGIS Desktop®, versão 10.1. A análise para a detecção de valores discrepantes foi feita utilizando-se a equação 1, tal como descrito por Cahn et al. (1994), para retirada destes para confecção dos mapas.

$$\text{Outlier}_{\max/\min} = x \pm 4\sigma \quad (1)$$

Onde  $x$  = média e  $\sigma$  = desvio padrão.

Para verificar a dependência espacial das variáveis, interpolar dados e elaborar os mapas, foi empregada a análise geoestatística de acordo com Vieira et al. (2000). Foram construídos semivariogramas, partindo das pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca e do cálculo da semivariância  $g(h)$  estimada pela Equação 2:

$$\gamma = 1/2N(h) \cdot \sum [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

Em que:  $N(h)$  é o número de pares dos valores medidos  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i+h)$ , separados por um vetor  $h$ . Com a utilização de software GS plus, foram testados os tipos de semivariogramas que melhor se adequaram. Foi calculado o grau de dependência (GD), que é a proporção em porcentagem do “partial sill” ( $C1$ ) em relação ao patamar ( $C_0+C1$ ) (Equação 2), sendo, segundo Zimback (2001) e Trangmar et al. (1985), dependência fraca  $<25\%$ , dependência moderada de 26% a 75% e dependência forte  $>75\%$ .

$$\text{GDE} = (C1/(C1 + C_0)) \times 100 \quad (3)$$

Sendo que o semivariograma representa a variabilidade espacial dos dados, a análise geoestatística permitiu a análise dos dados, comparando-se os parâmetros de ajuste dos semivariogramas para cada uma das variáveis estudadas.

Nos casos onde houve dependência espacial demonstrada pelo semivariogramas, foram estimados valores para qualquer outro local que não foi amostrado, usando-se a krigagem, que de acordo com Vieira et al. (2000), estima os valores com condições de não-tendenciosidade e com desvios mínimos em relação aos valores conhecidos, ou seja, com variância mínima (Equação 3):

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j(X_i, X_j) + \mu = \gamma(X_i, X_0), \quad \sum_{j=1}^N \lambda_j = 1 \quad (4)$$

Em que  $\gamma(X_i, X_j)$  é a semivariância estimada, usando o modelo ajustado ao semivariograma, correspondente à distância entre os pontos localizados na posição  $X_i$  e  $X_j$  e  $\gamma(X_i, X_0)$  é a semivariância correspondente à distância entre os pontos localizados na posição  $X_i$

e  $X_0$ . Valores de peso  $l$  e um valor do multiplicador de Lagrange,  $m$ , associado com a minimização da variância, são gerados e com os valores de  $l_i$  podem-se estimar valores ( $Z$ ) no espaço amostrado para qualquer posição  $X_0$ . Com os valores estimados (Equação 4), serão construídos mapas de isolinhas, em função da coordenada geográfica. O uso da krigagem como interpolador permite mostrar a variabilidade espacial de determinada área, pois a partir dela é possível a construção de mapas de isolinhas.

$$z^*(X_0) = \sum_{i=1}^N l_i Z(X_i) \quad (5)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISES DESCRITIVAS DOS MICRONUTRIENTES DISPONÍVEIS NO SOLO

Os maiores teores mínimo, médio e máximo de Cu foram encontrados nas camadas subsuperficiais (Tabela 3). Isto indica que esses teores desse micronutriente são oriundos do material de origem. Os teores médios encontrados em ambas as camadas se encontram definidos na classe média de acordo com Alvarez et al. (1999). Bortolon & Gianello (2009) analisando micronutrientes em amostras de solos os quais foram extraídas por Mehch-1 em solos representativos do estado Rio Grande do Sul, verificaram maiores teores desse micronutriente. Os valores médios do micronutriente Cu para ambas as camadas foram classificados como médios de acordo com Alvarez et al. (1999). Gontijo et al. (2012) em uma área de produção de Pimenta-do-reino sobre um Latossolo vermelho-amarelo, no município de São Matheus-ES, encontraram os teores médios classificados na classe média para o Cu. Chaves & Farias (2009) em um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Capim-PB, obteve uma média menor do que a encontrada neste trabalho. Pereira et al. (2001) em solos representativos do estado do Rio de Janeiro encontrou maior amplitude entre os dados.

Tabela 3. Teores de micronutrientes nas camadas superficiais e subsuperficiais.

Micronutriente	Unidade	Média	Valor		DP	CV (%)
			Máx.	Min		
Amostras superficiais						
Cu	mg dm <sup>-3</sup>	0,90	2,96	0	0,61	68,03
Fe		50,16	283,3	6,1	45,69	91,10
Mn		55,42	246,3	0,2	49,90	90,03
Zn		2,94	21,81	0,78	2,70	91,85
Amostras subsuperficiais						
Cu	mg dm <sup>-3</sup>	0,99	3,03	0,09	0,60	60,41
Fe		59,18	500,90	7,10	57,96	97,95
Mn		18,13	202,00	0,00	23,34	128,73
Zn		1,53	4,10	0,00	0,75	48,95

Mín. = Mínimo; Máx. = Máximo; DP = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação.

Os maiores valores máximos de Cu nas camadas superficiais e subsuperficiais foram encontrados em um Chernossolo Háplico sob vegetação nativa originário de rochas metamórficas ortognaisses e paragnaisses o que demonstra que esse valor vem do material de origem ali existente (Tabela 3). Os coeficientes de variação (CV) em ambas as camadas foram altos, isso pode ser explicado em virtude das amostras terem sido coletadas em diversas paisagens, solos e litologias diferentes. Outros autores encontraram CVs menores (CHAVES & FARIAS, 2009; GONTIJO et al., 2012).

O Fe apresentou seus maiores teores nas camadas subsuperficiais (Tabela 3). O valor máximo de  $500,90 \text{ mg dm}^{-3}$  foi encontrado em um Argissolo Vermelho sob pastagens originário de rochas metamórficas paragnaisses e ortognaisses, o quais eram ricas em intercalações de anfibolitos que são compostos principalmente, por epidoto, mineral esse que contém Fe (34,60 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (MACHADO et al., 2002). O valor médio de Fe foi inferior ao encontrado por Gontijo et al (2012) em uma área de produção de pimenta-do-reino sobre Latossolo vermelho-amarelo, no município de São Matheus-ES, em virtude dessas áreas estudadas por esse autor terem recebido adubações. A amplitude do Fe em ambas as camadas foi inferior ao encontrado por Pereira et al. (2001) em solos representativos do estado do Rio de Janeiro. Os CVs de ambas as camadas do Fe foram maiores do que o Cu, indicando maior variabilidade dos dados para este micronutriente nesses solos. Outros autores encontraram CVs menores para o Fe (GONTIJO et al., 2012).

O Mn apresentou comportamento contrário ao verificado pelos micronutrientes anteriores, sendo os maiores teores médio, mínimo e máximo encontrados nas camadas superficiais. O teor máximo superficial está localizado sobre um Argissolos Vermelho derivado de rochas metamórficas com predomínio de ortognaisses e paragnaisses. A amplitude do Mn em ambas as camadas foi inferior ao encontrado por Pereira et al. (2001) em solos representativos do estado do Rio de Janeiro. O teor médio foi superior na camada superficial ao por outros autores (CHAVES & FARIAS, 2009; GONTIJO et al., 2012). Ambos os CVs foram altos nas camadas superficiais e subsuperficiais, porém houve maior variabilidade nesta última. Outros trabalhos encontraram CVs menores para o Mn (CHAVES & FARIAS, 2009; GONTIJO et al., 2012).

O Zn também demonstrou características semelhantes ao Mn, no qual os teores médios, mínimo e máximo constam nas camadas superiores. O teor máximo superficial, também, foi encontrado no mesmo local do teor máximo do Zn, sob áreas de vegetação nativa em um Argissolo vermelho derivado de rochas metamórficas com predomínio de ortognaisses e paragnaisses, o que demonstra que a camada superficial concentra esse elemento em virtude biociclagem nessas superfícies, em função de sua absorção em superfícies minerais e orgânicas nessa camada (SILVA, 2009). A amplitude do Zn em ambas as camadas foi inferior ao encontrado por Pereira et al. (2001) em solos representativos do estado do Rio de Janeiro. Ambos os CVs das camadas superficiais e subsuperficiais foram classificados como altos, porém o CV nas camadas superficiais é quase o dobro das camadas subsuperficiais. O CV foi maior do que encontrado por Gontijo et al. (2012).

Com intuito de comparação, foram unidas as classes muito baixa e baixa em uma única classe (baixa), bem como as classes boa e alta em outra (alta) de acordo com a faixas de interpretação proposta por Alvarez V. et al. (1999) (Tabela 4). Nas camadas superficiais o Fe, Mn e Zn apresentaram maioria dos teores classificados como médio e alto mostrando que na área estudada há pouca necessidade de adubação desses micronutrientes (Tabela 4), porém maioria dos teores de Cu foram classificados como baixo e médio (ALVAREZ V. et al., 1999). Pereira et al. (2001) estudando solos representativos do estado Rio de Janeiro encontraram maioria dos dados de Cu na classe baixa, assim como esse trabalho. Os mesmos autores para Fe, Mn e Zn encontraram maioria dos dados classificados na classe alta. Kirst & Lobo (2007) analisando amostras de solos do município de Santa Cruz do Sul-RS no período de 2001 a 2005, verificaram maioria das amostras classificadas como altas para o Cu, Mn e Zn e teores normais para o Fe. Chaves & Farias (2009) em um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar, município de Capim na Paraíba, encontraram maiorias das amostras estudadas nas classes médias e altas para o Cu, e para o Mn maioria como baixas.

Tabela 4. Distribuição de frequência dos micronutrientes nas camadas superficiais e subsuperficiais.

Classes*	Cu	Fe	Mn	Zn
	%			
Camadas superficiais				
Baixo	47,31	23,65	4,30	1,07
Médio	27,96	9,68	5,38	18,28
Alto	24,73	66,67	90,32	80,65
Total	100	100	100	100
Camadas subsuperficiais				
Baixo	40,00	13,60	32,80	16,00
Médio	27,20	16,80	7,20	38,40
Alto	32,80	69,60	60,00	45,60
Total	100	100	100	100

\* Classes segundo Alvarez et al. (1999).

Nas camadas subsuperficiais (Tabela 4) o Cu apresentou comportamento semelhante com as camadas superficiais, demonstrando que o comportamento desse micronutriente é homogêneo ao longo do perfil dentre as amostras. O Fe obteve frequências menor na classe baixa, porém na classe médio foi obtido um leve aumento na frequência de dados, permanecendo a maior frequência de dados como alto. O Mn apresentou maior frequência de dados na classe baixa em relação as camadas superficiais. Enquanto o Zn, a maior frequência de dados foi na classe tido como alta, porém houve um aumento das frequências nas classes

baixo e média. As maiores frequências de dados nas classes superficiais, para o Mn e Zn, deve-se ao fato deles ficarem retidos na matéria orgânica que se encontra em maiores nessa camada.

#### 4.2 CORRELAÇÕES

A correlação negativa do Cu com areia é em função dessa fração ser menos reativa no solo, podendo inferir que solos mais arenosos são pobres neste micronutriente (Tabela 5). A correlação positiva com o silte ocorre, provavelmente, em virtude dos minerais de argilas e óxidos de Fe e Mn formarem agregados do tamanho do silte como verificado por Fadigas et al. (2010) em argissolos e latossolos, intemperizados, dos estados do Pará e Amapá. A correlação positiva com a argila é dada em virtude dessa fração ser mais reativa no solo. A correlação positiva do Cu com o pH deve-se ao fato de boa parte das amostras encontrarem-se na faixa ótima de pH para esse micronutriente (ABREU et al., 2007). Santos e Alleoni (2013) estudando solos de referência dos estados de Mato Grosso e Rondônia também encontraram correlações semelhantes com as frações granulométricas do solo: areia, silte e argila. Biondi et al. (2011) em solos representativos do estado do Pernambuco encontraram correlação do Cu com a argila, porém, Mattos (2014) estudando amostras do Médio Paraíba no estado do Rio de Janeiro não encontrou correlações significativas com silte e argila.

Tabela 5. Correlação de Pearson entre os micronutrientes e os atributos nas camadas superficiais e subsuperficiais.

Parâmetros	Cu	Fe	Mn	Zn
Camadas superficiais				
Areia	-0,66**	-0,23*	-0,37**	-0,18ns
Silte	0,48**	0,46**	0,24*	0,19ns
Argila	0,67**	-0,02ns	0,37**	0,23*
pH	0,31**	-0,26*	0,39**	0,32**
P	-0,01ns	0,06ns	0,06ns	0,29**
K	0,08ns	-0,06ns	0,62**	0,49**
Na	0,46**	0,34**	-0,03ns	0,01ns
Ca	0,51**	0,04ns	0,44**	0,45**
Mg	0,58**	0,16ns	0,28**	0,12*
Al	0,24*	0,30*	-0,30**	-0,24*
SB	0,56**	0,16ns	0,43**	0,41**
CTC (pH 7)	0,25*	0,06ns	0,24*	-0,01ns
V %	0,41**	0,05ns	0,47**	0,38**
MO	-0,08ns	0,11ns	0,58**	0,65**
Cu	1	0,53**	0,23*	0,12ns
Fe		1	-0,05ns	-0,06ns
Mn			1	0,63**
Zn				1
Camadas subsuperficiais				
Areia	-0,44**	0,26**	-0,21*	-0,02ns
Silte	0,33**	0,18ns	0,45**	0,22*
Argila	0,44**	-0,23ns	0,05ns	-0,04ns
pH	0,47**	0,13ns	0,54**	0,48**
P	0,12ns	-0,04ns	0,28**	0,38**
K	-0,06ns	-0,11ns	0,03ns	0,13ns
Na	0,05ns	0,24**	0,20*	0,10ns
Ca	0,51**	0,35**	0,51**	0,46**
Mg	0,52**	0,36**	0,45**	0,25**
Al	-0,17ns	-0,05ns	-0,36**	-0,23*
SB	0,54**	0,43**	0,53**	0,41**
CTC (pH 7)	0,31**	0,19*	0,47**	0,44**
V %	0,49**	0,16ns	0,55**	0,37**
MO	0,21**	0,24**	0,54**	0,43**
Cu	1	0,41ns	0,63**	0,51**
Fe		1	0,24**	0,49**
Mn			1	0,65**
Zn				1

\*\* , \* e ns significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente.

A correlação do Cu com Fe e Mn evidencia afinidade geoquímica entre eles assim como verificada por Mattos (2014) em solos da Região do Médio Paraíba - RJ. Burak et al. (2010) em latossolos do Planalto Central brasileiro encontraram correlação do Cu com o Fe, no qual afirmam que a formação de óxidos de ferro secundários que têm a capacidade de adsorver fortemente este micronutriente. Dafonte et al. (2010) encontraram correlação do Cu com os outros micronutrientes estudados (Fe, Mn e Zn) na camada 0 – 30 cm nos solos de uma área agrícola, na Galícia, Espanha, sob condições climáticas do Atlântico Europeu.

A correlação não significativa do Cu com a MO nas camadas superficiais, deve-se ao fato de ambos os teores do Cu e MO encontrarem-se na maior parte das amostras em níveis baixos podendo indicar uma forte lixiviação para as camadas subsuperficiais, pois o Cu não teria como formar complexos, visto que também a maioria dos solos são de textura arenosa e média (ABREU et al., 2007). Biondi et al. (2011) encontraram resultados semelhantes para solos de referência do estado Pernambuco, correlações positivas com pH, argila e MO, no entanto outros trabalhos não verificaram correlação positiva com o pH (SANTOS & ALLEONI, 2013; MATTOS, 2014). Essas correlações foram semelhantes das camadas superficiais, demonstrando que o comportamento do Cu não varia ao longo do perfil dos solos (Tabela 5). Biondi et al. (2011) encontraram correlações positivas significativas com pH, argila e MO nas camadas subsuperficiais.

Solos arenosos são pobres em Fe, devido à baixa capacidade dessa fração em reter este micronutriente em sua superfície (Tabela 5). A correlação negativa deste micronutriente com o pH deve-se em função da maioria das amostras estudadas encontrem-se fora da faixa de pH ideal para maior disponibilidade deste micronutriente que é de 4 a 6 (ABREU et al., 2007). A correlação não significativa deste micronutriente com argila deve ser em função dessa fração provavelmente ser pobre em argilominerais e óxidos de Ferro. Biondi et al. (2011) afirmam que a alta correlação entre o Fe e a argila está ligada aos argilominerais. Birani et al. (2015) também não verificaram correlações significativas deste com a argila em latossolos, somente em argissolos, no estado do Pará e Souza et al. (2015) também não verificou correlação em argissolos do estado do Minas Gerais. Fadigas et al. (2010) encontram correlações do Fe com Cu, Mn e Zn em argissolos e latossolos sobre vegetação nativa nos estados do Pará e Amapá. Biondi et al. (2011) encontraram correlações significativas positivas do Fe com argila, Mn e Zn. Mattos (2014) encontraram correlação significativa positiva com pH e Al.

O maior número de correlações nas camadas subsuperficiais (Tabela 5), para o Fe, pode indicar a erosão das camadas superiores através de escoamento superficial, considerando que boa parte da região apresenta terreno suavemente ondulado (AQUINO, 2013). A correlação significativa do Fe nessa camada com a argila demonstra maior composição de argilominerais e óxidos de ferro dessa fração nessas camadas. A correlação do Fe com os micronutrientes Mn e Zn mostra afinidade geoquímica entre eles. Biondi et al. (2011) encontraram também correlação deste micronutriente nas camadas subsuperficiais com argila, Mn e Zn.

As correlações negativas com a areia e positiva com a argila demonstra que este micronutriente predomina em solos argilosos (Tabela 5). Assim como aconteceu no Cu, a correlação positiva do Mn com o silte ocorre, provavelmente, em virtude dos minerais de argilas

e óxidos de Fe e Mn formarem agregados do tamanho do silte (FADIGAS et al., 2010). Birani et al. (2015) também verificaram correlações negativas com a areia e positivas com a argila em latossolos, porém não encontrou as mesmas correlações em argissolos. A correlação positiva do Mn com o pH deve-se ao fato de boa parte das amostras encontrarem-se na faixa ideal de pH para esse micronutriente (ABREU et al., 2007). Biondi et al. (2011) verificaram correlações significativas positivas do Mn nas camadas superficiais com a argila, pH e Zn. A semelhança das correlações em ambas as camadas podem evidenciar comportamento homogêneo do micronutriente ao longo do perfil do solo (Tabela 5). Biondi et al. (2011) também encontraram correlações significativas com argila, pH e Zn.

Assim como o Cu e o Mn, o Zn apresentou correlação positiva com argila mostrando que essa fração está intrinsecamente relacionado a esses micronutrientes (Tabela 5). A correlação positiva dos micronutrientes com o pH contraria outros estudos em que os autores afirmam que solos mais ácidos apresentam a maior disponibilidade desses (NACHTIGALL et al., 2009; SOUZA et al., 2010). Santos e Alleoni (2013) encontraram resultados semelhantes, uma correlação significativa negativa com areia, positiva com argila, silte, pH, P, K, Ca, CTC, V (%). Biondi et al. (2011) encontraram correlações positivas com argila e MO nas camadas superficiais. Mattos (2014) encontrou correlação significativa com argila, positivas com Ca e Mg. O Zn nas camadas subsuperficiais correlacionou-se com menos atributos dos solos do que nas camadas subsuperficiais, significativa negativa com Al, positiva com silte, pH, P, Ca, Mg, SB, CTC, V (%) e MO (Tabela 5). Biondi et al. (2011) encontraram somente correlação com a argila.

#### 4.3 ANÁLISES GEOESTATÍSTICAS DOS MICRONUTRIENTES DISPONÍVEIS NO SOLO

Nas camadas superficiais o modelo gaussiano foi ajustado para Cu, Fe e Mn, indicando que esses tiveram pouca variabilidade a curta distância (LANDIM, 2006). O modelo de semivariograma ajustado para o Zn foi o exponencial, porém Cu e Zn apresentaram o menor coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (Tabela 6). Alguns trabalhos também definiram o modelo Gaussiano para o Cu, Fe e o Mn (DAFONTE et al., 2010; WANI et al., 2012). Souza et al. (2015) estudando os solos do estado de Minas Gerais definiram o modelo exponencial para Cu, Fe e Mn. Outros trabalhos definiram o modelo Exponencial para o Zn (DAFONTE et al., 2010; WANI et al., 2012). Júnior et al. (2015) definiram o modelo esférico para todos os micronutrientes estudados em solos no estado de São Paulo. Para as camadas subsuperficiais o

modelo exponencial se ajustou para Cu e Fe, e o Gaussiano para Mn e Zn, todas as funções apresentaram baixo coeficiente de determinação.

Tabela 6. Modelos de semivariogramas ajustados para atributos em ambas as camadas.

Micronutrientes	Modelo	C0	C1	Alcance (km)	-----GD (%)-----		r <sup>2</sup>
Camadas superficiais							
Cu	Gaussiano	0,29	0,46	72,16	61,33	Moderada	0,01
Fe	Gaussiano	788,77	1022,06	41,25	56,44	Moderada	0,34
Mn	Gaussiano	600,98	1665,68	5,57	73,49	Moderada	0,46
Zn	Exponencial	0	4,48	2,80	100,00	Forte	0,04
Camadas subsuperficiais							
Cu	Exponencial	0,09	0,4	2,67	81,63	Forte	0,13
Fe	Exponencial	0	2354,70	2,67	100,00	Forte	0,14
Mn	Gaussiano	0	428,88	2,67	100,00	Forte	0,15
Zn	Gaussiano	0,32	0,43	6,88	57,33	Moderada	0,12

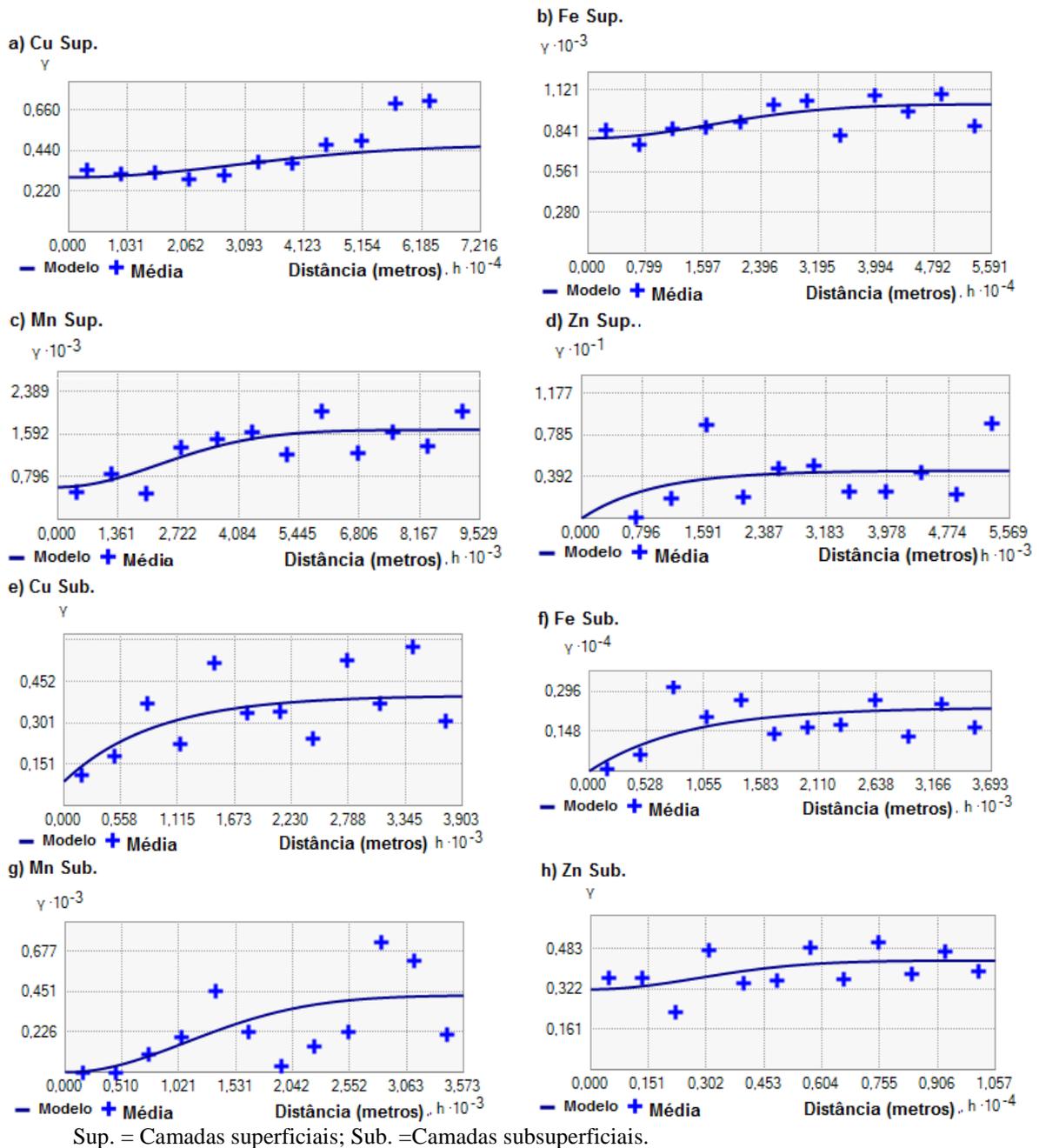
C0: efeito pepita; C1: patamar; GD: grau de dependência espacial; r<sup>2</sup>: coeficiente de correlação.

O efeito pepita (C<sub>0</sub>) apresentou alta variação somente nas camadas superficiais de 0-788,77; enquanto que nas subsuperficiais houve pouca variação, entre 0,09-0,32 (Tabela 6). Segundo Vieira (2000) valores baixos de C<sub>0</sub> indicam baixos erros na medição e podem indicar alta dependência espacial. O Fe e Mn apresentam dependência espacial baixa nas camadas superficiais em virtude de seus altos valores de C<sub>0</sub> (788,77 e 600,98, respectivamente). Outros autores encontraram valores do efeito pepita bem menores (DAFONTE et al., 2010; WANI et al., 2013; YE et al., 2015). O Cu e o Fe apresentaram os maiores valores de alcance (72,16 e 41,25 km, respectivamente), para as camadas superficiais, indicando que esses têm variabilidade espacial menor, o que foi observado nos seus respectivos mapas (Figura 5 a; b) uma maior homogeneidade. Souza et al. (2015) verificaram alcances menores para Cu, Fe, Mn e Zn, mesmo estudando uma área de maior extensão, o estado de Minas Gerais, do que esse trabalho. Gontijo et al. (2012) verificaram maior alcance para o Mn em uma área de produção de pimenta do reino sobre Latossolo Vermelho-Amarelo no estado do Espírito Santo. Desse modo, as estimativas adquiridas por interpolação por krigagem para Mn e Zn apresentam-se menos definidas em relação aos outros atributos avaliados, em razão dos menores valores de alcance de dependência espacial (GONTIJO et al., 2012). Nas camadas subsuperficiais apresentaram valores iguais de alcance para Cu, Fe e Mn, enquanto que para o Zn foi um pouco maior.

Foi verificada dependência espacial em todos os micronutrientes em ambas as camadas superficiais e subsuperficiais (Tabela 6, figura 4). Cu, Fe e Mn apresentaram dependência moderada indicando uma forte correlação e dependência Zn nas camadas

superficiais. As camadas subsuperficiais apresentam comportamento inverso. Burak et al. (2010) encontraram forte dependência espacial para Cu e Zn, moderada para Fe e Mn. Souza et al. (2015) encontraram forte dependência espacial para o Fe e moderada para Cu e Mn.

Figura 4. Semivariogramas dos micronutrientes com os teores dos solos do Sertão central do Ceará.

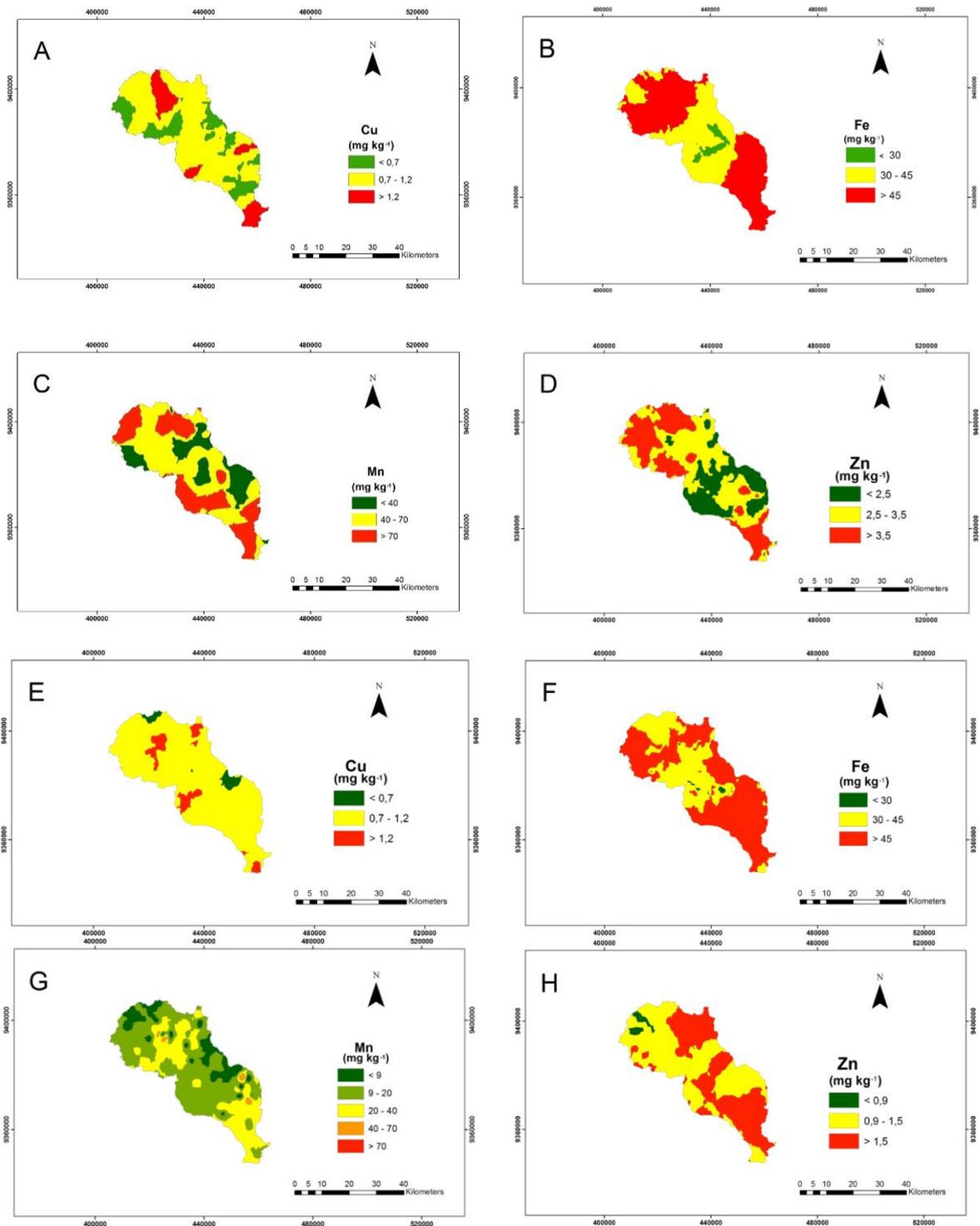


Cu e Fe apresentaram comportamento semelhantes em seus semivariogramas em ambos as camadas (Figura 4), apesar das estruturas diferentes (efeito pepita e patamar). Valladares et al. (2009) verificaram semelhanças entre os semivariogramas de Cu e Zn em Argissolos e Cambissolos em duas microbacias no município de Jundiá. Os patamares para

esses dois micronutrientes nas camadas superficiais são pouco definidos, entretanto, foi verificado dependência espacial. Enquanto para os micronutrientes nas camadas subsuperficiais o patamar é mais evidente. Valladares et al. (2009) encontraram patamares bem definidos para Cu em ambas as camadas estudadas. Mn e Zn apresentaram patamares bem definidos em seus semivariogramas para as camadas superficiais e Cu, Fe e Mn para os subsuperficiais.

A maior parte da área estudada para o Cu encontra-se com teores médios nas camadas superficiais e os maiores teores na parte Sul sob solos originados de migmatitos de composição granítica e no centro do Norte sobre solos originados de paragneisses e ortogneisses (Figura 5 a). Para o Fe, os valores de médios a altos são verificados na maior parte da área, sendo que os menores se encontram na parte central, os quais apresentam solos derivados de areias quartzosas e feldpáticas (AQUINO, 2013). A mancha verde próxima ao limite do mapa se localiza sobre 3 tipos de solos: planossolos, luvisolos e vertissolos. Podendo demonstrar que esses tipos de solos são pobres em Fe nas camadas superficiais. Susam (2015) numa bacia hidrográfica em Tokat, na Turquia, observou que a maior parte da área estudada apresenta níveis suficientes de cobre devido a adubação desse nutriente, o que não ocorre na área deste trabalho devido ao baixo nível tecnológico empregado.

Figura 5. Distribuição espacial dos teores de micronutrientes nas camadas superficiais e subsuperficiais.



Camadas superficiais: A, B, C e D; Camadas subsuperficiais: E, F, G e H.

De acordo com o mapa de Mn obtido pela krigagem ordinária no Arc Gis 10.1, para as camadas superficiais (Figura 5 C), os valores obtidos foram bastante elevados, portanto não se enquadraram nas classes propostas por Alvarez et al. (1999), sendo, portanto, adotado classes

maiores. Esses altos valores devem ter sido influenciados pelo fato haver alguns teores cerca de 20 vezes maior do que o limite da classe alta para o Mn. Os maiores valores foram verificados na parte sul sob solos originados de migmatitos; centro-oeste sob paragnaisses; noroeste e norte do mapa sob paragnaisses e ortognaisses tonalíticos (Figura. 5 C).

Houve uma similaridade dos mapas superficiais de Cu e Mn (Figuras 5 a; c) corroborando com a correlação entre esses dois micronutrientes (Tabela 5). Outros autores encontraram semelhança entre os mapas de Cu e Mn (DAFONTE et al., 2010; WANI et al., 2012). O Zn nas camadas superficiais (Figura 5 d) apresentou comportamento semelhante ao verificado pelo manganês, os quais os valores apresentados no mapa foram bastantes superiores a classificação proposta por Alvarez et al. (1999). Os maiores teores no mapa foram verificados nas partes norte e sul. Assim como na correlação de Pearson (Tabela 5) o Zn também apresentou semelhança em mapa com o Mn, nas camadas superficiais, comprovando que há uma correlação espacial entre eles.

Nas camadas subsuperficiais para o Cu, houve uma redução na área dos teores classificados como baixos e altos (Figura 5 e), isso provavelmente aconteceu em virtude dos dados de determinados pontos serem compostos por mais duas ou mais amostras que foram feitas as médias o que reduziu ou aumentou o valor do ponto amostrado, na hora ser confeccionado os mapas no programa. Para o Fe nas camadas subsuperficiais houve um aumento não muito expressivo na área com valores na classe alta, corroborando com a aumento verificado na porcentagem de amostras contidas nessa classe (Tabela 4; Figura 5 f).

O Mn nas camadas subsuperficiais apresentou uma redução em relação as classes propostas que foram adotadas nas camadas superficiais, porém, com classes mais altas do que as propostas por Alvarez et al. (1999). O Zn nas camadas subsuperficiais, ao contrário do que foi verificado nas camadas superficiais (Figura 5 d, h), se adequou as classes propostas por Alvarez et al. (1999), corroborando com o que foi verificado na redução da porcentagem de amostras nas classes mais altas. Os mapas de Fe e Zn apresentaram uma certa semelhança entre eles corroborando com a correlação verificada entre os dois micronutrientes nas camadas subsuperficiais (Tabela 5; Figura 5 f, h).

## 5 CONCLUSÕES

- Há uma alta variabilidade dos teores para cada nutriente na área estudada.
- Os micronutrientes correlacionam-se em com os atributos estudados nos solos.
- Os micronutrientes apresentaram maiores correlações entre si nas camadas subsuperficiais.
- A análise variográfica demonstrou que estes micronutrientes são estruturados espacialmente, ou seja, apresentam dependência espacial.
- Os modelos gaussiano e exponencial indicaram predominância sobre os outros modelos testados.
- Na maior parte da área estudada predominam os teores médios para Cu e teores altos para Fe, Mn e Zn em ambas as camadas.

## 6 REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A. de; LOPES, A. S.; SANTOS, G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa-MG, Sociedade Brasileira de ciência do solo, 2007.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; CANTARUTTI, R.B.; LOPES, A.S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa, 1999. p.25-32.
- AQUINO, R. P. De. **Vulnerabilidade ambiental dos compartimentos morfopedológicos de trecho do alto Banabuiu-Ce**. 2013. 96f. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Federal do Piauí. Teresina, PI, 2013.
- BAGNARA, D.; PRIETTO, P. D. M.; TIMBOLA, R. de S. Aplicação da krigagem ordinária na modelagem do pH e da dureza da água subterrânea na área central de Passo Fundo-RS. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 20, p. 15-22, 2012.
- BIONDI, C. M.; NASCIMENTO, C. W. A. do; NETA, A. de B. F.; RIBEIRO, M. R. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni e Co em solos de referência de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 3, 2011.
- BIRANI, S. M.; FERNANDES, A. R.; BRAZ, A. M. S.; PEDROSO, A. J. S.; ALLEONI, L. R. F. Available contents of potentially toxic elements in soils from the Eastern Amazon. **Chemie der Erde-Geochemistry**, v. 75, n. 1, p. 143-151, 2015.
- BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Disponibilidade de cobre e zinco em solos do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 647-658, 2009.
- BURAK, D. L.; FONTES, M. P. F.; SANTOS, N. T.; MONTEIRO, L. V. S.; MARTINS, E. de S.; BECQUER, T. Geochemistry and spatial distribution of heavy metals in Oxisols in a mineralized region of the Brazilian Central Plateau. **Geoderma**, v. 160, n. 2, p. 131-142, 2010.
- BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of geographic information systems**. Oxford: Oxford University Press, 1998. 333p.
- CAHN, M. D.; HUMMEL, J. W.; BROER, B. H. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.1240-1248, 1994.
- CALA, V.; CASES, M. A.; WALTER, I. Biomass production and heavy metal content of *Rosmarinus officinalis* grown on organic waste-amended soil. **Journal Arid Environments**, v. 62, n. 4, p. 401-412, 2005.
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas, Instituto Agrônomo, 2009. 77 p. (Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada).

CAMARGO de, O. A. Reações e interações de micronutrientes no solo. 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <[http://www.infobibos.com/Artigos/2006\\_3/micronutrientes/Index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2006_3/micronutrientes/Index.htm)>. Acesso em: 10/06/2016.

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

CARVALHO, S. R. L.; VILAS BOAS, G. S.; FADIGAS, F. S. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em solos originados nos sedimentos da formação barreiras. **Cadernos de Geociências**, v. 7, n. 2, p. 63-79, 2010.

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

COELHO, A. M. **Agricultura de precisão**: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas. SeteLagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. 60 p. (Documentos, 46).

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução no 420, de 28 de dezembro de 2009. "Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.", Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF, nº 249, de 30/12/2009. p.81-84. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1>>. Acesso em 30 agosto 2014.

CORÁ, J. E.; ARAÚJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de Agricultura de Precisão na cultura da Cana-de-Açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 1013-1022, 2004.

COUTO, E. G.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de micronutrientes em solo sob pivô central no sul do Estado de Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 12, p. 2331-2339, 1999.

DAFONTE, J. D., GUITIÁN, M. U., FERREIRO, J. P., SIQUEIRA, G. M., VÁZQUEZ, E. V. Mapping of soil micronutrients in an european atlantic agricultural landscape using ordinary kriging and indicator approach. **Bragantia**, v. 69, p. 175-186, 2010.

OLIVEIRA, A. B.; WILLIAMS, C.; DO NASCIMENTO, A. Formas de manganês e ferro em solos de referência de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 99-110, 2006.

DECHEN, A. R.; NATCHIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição da plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa-MG, Sociedade Brasileira de ciência do solo, 2007.

EMBRAPA. CNPS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa solos: EMBRAPA/Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2005, 412 p.

EMBRAPA-SOLOS, **Manual de Métodos de Análises de Solos**. 1997.

FADIGAS, F. de S.; SOBRINHO, N. M. B. do A.; MAZUR, N.; DOS ANJOS, L. H. C.; FREIXO, A. A. Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. **Bragantia**, v. 61, n. 2, 2002.

FADIGAS, F. S.; SOBRINHO, N. M. B. do A.; ANJOS, L. H. C.; MAZUR, N. Background levels of some trace elements in weathered soils from the Brazilian Northern region. **Scient Agricola**, v.67, n.1, p.53-59, 2010.

GONTIJO, I.; NICOLE, L. R.; PARTELLI, F. L.; BONOMO, R.; SANTOS, E. O. de J. Variabilidade e correlação espacial de micronutrientes e matéria orgânica do solo com a produtividade da pimenta-do-reino. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. v. 36, n. 4, p. 1093-1102, 2012.

GUIMARÃES, C. C. B. **Paisagens sertanejas: uso e cobertura das terras e adequabilidade no Sertão Central do Ceará**. 2013. 74f. Dissertação (Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais) Universidade Federal do Ceará, Centro de ciências, Departamento de biologia. Fortaleza, CE, 2013.

HUGEN, C.; MIQUELLUTI, D. J.; CAMPOS, M. L.; ALMEIDA, J. A. de; FERREIRA, E. R. N. C.; POZZAN, M. Teores de Cu e Zn em perfis de solos de diferentes litologias em Santa Catarina. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 622-628, 2013.

IBGE. Brasil. Ministério de Planejamento e Orçamento. Diagnóstico ambiental da Bacia do Rio Jaguaribe: Diretrizes gerais para a ordenação Territorial. Salvador, 1999. Disponível em: <[ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/recursos\\_naturais/diagnosticos/jaguaribe.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/recursos_naturais/diagnosticos/jaguaribe.pdf)>: Acesso em: 15 ago. 2015.

IPECE, Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. 2007. Ceará em mapas, 1.2.5. Unidades Fitoecológicas. Disponível em: <<http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/>>. Acesso em: 25 jul. 2015.

JÚNIOR, J. M.; ALLEONI, L. R. F.; TEIXEIRA, D. de D.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Sampling planning of micronutrients and aluminium of the soils of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 4, p. 91-99, 2015.

KABATA-PENDIAS, A. Soil-plant transfer of trace elements—an environmental issue. **Geoderma**, v. 122, n. 2, p. 143-149, 2004.

KIRST, A.; LOBO, E. A. Micronutrientes nos solos do município de Santa Cruz Do Sul, Rs, Brasil. **Tecno-Lógica**, v. 11, n. 1, p. 5-10, 2007.

LADO, L. R.; HENGL, T.; REUTER, H. I. Heavy metals in European soils: a geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. **Geoderma**, v. 148, n. 2, p. 189-199, 2008.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terræ Didática**, v. 2, n. 1, p. 19-33, 2006.

MACHADO, F. B.; MOREIRA, C. A.; ZANARDO, A.; ANDRE, A. C.;GODOY, A. M.; FERREIRA, J. A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A. J. R.; ARTUR, A. C.; OLIVEIRA, M. A. F. de. **Atlas de Rochas**. [on-line]. ISBN: 85-89082-12-1. 2002. Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.rc.unesp.br/museudpm>. Acesso em 25 de Janeiro de 2016.

- MATTOS, A. G. **Valores de referência de qualidade e adsorção de metais pesados e solos da Região do Médio Paraíba – RJ**. 2014. 73f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2014.
- NACHTIGALL, G. R.; NOGUEIROL, R. C.; ALLEONI, L. R. F. Extração sequencial de Mn e Zn em solos em função do pH e adição de cama-de-frango. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 03, p. 240-249, 2009.
- NELSON, W. L.; MEHLICH, A.; WINTERS, Eric. The development, evaluation, and use of soil tests for phosphorus availability. **Agronomy**, v. 4, n. 2, p. 153-188, 1953.
- OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ABREU JUNIOR, C. H. Alterações em atributos químicos de um Latossolo pela aplicação de composto de lixo urbano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 37, n. 4, p. 529-538, 2002.
- ORTIZ, F. R.; BRITO, O. R.; BORKER, C. M. Extratores para a quantificação de zinco, cobre e manganês em solo arenoso. **Scientia agraria**, v. 8, n. 1, p. 95-98, 2007.
- 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 de ciência do solo**, v. 25, n. 3, p. 655-660, 2001.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: bases para distinção de ambientes**. 4. ed. Viçosa: NEPUT, 2007. 322p.
- ROCHA, G. C. Micronutrientes nos solos do Brasil. **Semina: Ciências agrícola.**, Londrina, v. 16, n. 1, p. 158-168, 1995.
- ROSS, J. L. S. **Geografia do Brasil**. São Paulo: EDUSP, 2000.
- SANTOS, R. D. **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo**. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.
- SANTOS, S. N. dos; ALLEONI, L. R. F. Methods for Extracting Heavy Metals in Soils from the Southwestern Amazon, Brazil. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 224, n. 2, p. 1-16, 2013.
- SILVA, J. B. da. **Micronutrientes em perfis de solos do Escudo Sul-riograndense**. 2009. 76p. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.
- SOUZA, L. H.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; VILLANI, E. M. de A. Efeito do pH do solo rizosférico e não rizosférico de plantas de soja inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* na absorção de boro, cobre, ferro, manganês e zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2010.
- SOUZA, J. J. L. L.; ABRAHÃO, W. A. P., MELLO; J. W. V., SILVA, J.; COSTA, L. M.; OLIVEIRA, T. S. Geochemistry and spatial variability of metal (loid) concentrations in soils of the state of Minas Gerais, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 505, p. 338-349, 2015.

SUSAM, T. Application of geostatistical techniques in mapping topsoil and subsoil chemical composition. **Journal of Engineering Research**, v. 3, n. 2, p. 1-16, 2015.

TRANGMAR, B. B.. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in agronomy**, v. 38, n. 1, p. 45-94, 1985.

VALLADARES, G. S., AZEVEDO, E. C., CAMARGO, O. A., GREGO, C. L., RASTOLDO, A. M. C. S. Variabilidade espacial e disponibilidade de cobre e zinco em solos de vinhedos e adjacências. **Bragantia**, v. 68, n. 3, p. 733-742, 2009.

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 Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 6, p. 859-864, 2007.

VIEIRA, S. R., NOVAIS, RF, ALVAREZ, VH, SCHAEFER, C. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-54, 2000.

VIG, K.; MEGHARAJ, M.; SETHUNATHAN, N.; NAIDU, R. Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: a review. **Advances in Environmental Research**, v.8, p.121-135, 2003.

WALKER, D. J.; CLEMENTE, R.; BERNAL, M. P. Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by pyritic mine waste. **Chemosphere**, v. 57, n. 3, p. 215-224, 2004.

WANI, M. A.; WANI, J. A.; BHAT, M. A.; KIRMANI, N. A.; WANI, Z. M.; BHAT, S. N. Mapping of soil micronutrients in Kashmir agricultural landscape using ordinary Kriging and indicator approach. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 319-329, 2013.

YE, H.; SHEN, C.; HUANG, Y.; HUANG, W.; ZHANG, S.; JIA, X. Spatial variability of available soil microelements in an ecological functional zone of Beijing. **Environmental monitoring and assessment**, v. 187, n. 2, p. 1-12, 2015.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. Botucatu: FCA/UNESP, 2001. 114p. Tese de Doutorado. Tese Livre-Docência.