

JUCICLÉIA SOARES DA SILVA

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA SALINIDADE DO SOLO E DA
PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR EM ÁREA DE SEQUEIRO**

**RECIFE - PE
FEVEREIRO - 2016**

JUCICLÉIA SOARES DA SILVA
Tecnóloga em Gestão de Fruticultura Irrigada

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA SALINIDADE DO SOLO E DA
PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR EM ÁREA DE SEQUEIRO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração: Engenharia de água e solo.

Orientador: Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva

RECIFE - PE
FEVEREIRO - 2016

Ficha catalográfica

S586v Silva, Jucicléia Soares da
Variabilidade espacial e temporal da salinidade do solo e da
produtividade de cana-de-açúcar em área de sequeiro / Jucicléia
Soares da Silva. – Recife, 2016.
116 f. : il.

Orientador: Ênio Farias de França e Silva.
Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade
Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia
Agrícola, Recife, 2016.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Manejo de sais 2. Íons solúveis 3. Zonas de manejo
4. Agricultura de precisão 5. Geoestatística 6. *Saccharum spp.*
I. Silva, Ênio Farias de França e, orientador II. Título

CDD 631

JUCICLÉIA SOARES DA SILVA

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA SALINIDADE DO SOLO E DA
PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR EM ÁREA DE SEQUEIRO**

Tese defendida e aprovada em 29 de fevereiro de 2016 pela Banca Examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva
DEAGRI-UFRPE

Examinadores:

Prof. Dr. Hans Raj Gheyi
NEAS-UFRB

Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro
DEAGRI-UFRPE

Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza
DEAGRI-UFRPE

Dr. Djalma Euzébio Simões Neto
EECAC-UFRPE

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe (*in memoriam*), pela dedicação, educação, esforço, atenção, carinho e amor por mim até o último dia de sua vida.

Aos meus irmãos (Lucília, Jucélia, Francisco, João e Juscelino) pela dedicação, educação, esforço, atenção, apoio, amor, carinho e incentivo durante toda minha vida.

Aos meus sobrinhos (Dayanne, Walleon, Aldo e Williene) pelo amor e carinho dado em todos os momentos.

Ao meu noivo (Fernando) pela compreensão de minhas ausências durante a vida acadêmica, pelo amor e carinho em todos os momentos.

*“O bem que você faz hoje pode ser esquecido amanhã.
Faça o bem assim mesmo. Veja que, ao final das contas, é tudo entre você e DEUS!
Nunca foi entre você e os outros”
(Madre Teresa de Calcutá)*

AGRADECIMENTOS

A Deus por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar o caminho nas horas incertas e suprir todas as minhas necessidades;

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia Agrícola, por meio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, representada pelo Coordenador Professor Dr. Mário Monteiro Rolim, pela oportunidade de ingresso no Doutorado e pela concessão da infraestrutura para a execução do trabalho;

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) e a Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa;

Ao meu Orientador Professor Dr. Ênio Farias de França e Silva pela orientação, atenção, paciência, apoio e ensinamentos durante o doutorado;

Ao Professor Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro pela atenção e ensinamentos durante o doutorado;

À Usina Santa Tereza, ao Gerente Gledson Correia, Técnico do campo Adelino e trabalhadores rurais, pela concessão da área experimental e pelo apoio na condução do experimento;

Ao Diego Henrique Silva de Souza pela dedicação, auxílio, apoio, disposição, empenho constante em ajudar durante a execução deste trabalho e pela amizade construída;

Às minhas companheiras Janice Coelho e Raquele Lira pelo auxílio, disposição nas amostragens no decorrer do experimento, atenção, paciência, compreensão e, principalmente, pela bela amizade construída;

À Tatyana Keyty pelo apoio, disposição, atenção, paciência, compreensão e, principalmente, pela bela amizade construída;

À minha família que sempre me apoiou em todos os momentos: Lucília, Jucélia, Francisco, João, Juscelino, Fernando, Dayanne, Walleson, Aldo e Williene;

À minha turma de doutorado, por todos os momentos vividos com alegria e dificuldades, à Uilka, Thais Fernanda, Anderson, Patrícia e Nadielan, pelo auxílio, apoio, disposição e pela amizade construída;

À turma da disciplina de geoestatística, Carlyne Wanessa, José Roberto, Alan César, Wellington e demais já citados, pelo auxílio, apoio em todos os momentos e pela amizade construída;

Ao GEPEA, em especial Tatiana Patrícia, Diogo, Cleene, Jéssyka, Rafael, e os demais já citados, pela bela amizade construída;

Aos meus amigos de curso, à Hammady, Mara, Daniel, Alexandre, Breno, Gerônimo, Anamaria, Alexsandro, Rodrigo, Natália, Andréa, Miguel, Vilma, Ana Karina, Diego Huggins, Mércia, Rochele, Adriana Guedes, Liliane, Valdemir Júnior, Renato, Célia, Daniela, Aline, e os demais já citados;

Aos professores, funcionários, pós-doutorandos e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela convivência e amizade;

Ao Professor Dr. Vital Pedro da Silva Paz pela orientação, compreensão, dedicação, atenção, paciência, ensinamentos, incentivo, apoio e amizade em todos os momentos;

Ao Professor Dr. Tales Miler Soares pela orientação, atenção e ensinamentos durante o mestrado;

Ao Professor Dr. Luís Fernando de Souza Magno Campeche pela orientação, atenção, ensinamentos na graduação, apoio, incentivo e amizade em todos os momentos;

A todos que contribuíram diretamente e indiretamente para execução e elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	12
1. CAPÍTULO I.....	13
REVISÃO DE LITERATURA	13
1.1. Cana-de-açúcar	14
1.2. Salinidade	18
1.3. Variabilidade espacial	24
1.4. HIPÓTESES	27
1.5. OBJETIVOS.....	27
1.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
2. CAPITULO II.....	36
2.1. RESUMO	37
2.2. ABSTRACT	38
2.3. INTRODUÇÃO.....	39
2.4. MATERIAL E MÉTODOS	40
2.4.1. Caracterização da área experimental	40
2.4.2. Amostragens.....	44
2.4.3. Análises laboratoriais.....	45
2.4.4. Classificações para os solos afetados por sais	47
2.4.5. Análises estatísticas e geoestatísticas	47
2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
2.6. CONCLUSÕES	71
2.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
3. CAPITULO III	77
3.1. RESUMO	78
3.2. ABSTRACT	79
3.3. INTRODUÇÃO.....	80
3.4. MATERIAL E MÉTODOS	81
3.4.1. Caracterização da área experimental	81
3.4.2. Amostragens.....	83
3.4.2.1. Umidade volumétrica do solo.....	84

3.4.2.2.	Condutividade elétrica aparente do solo	84
3.4.3.	Análises laboratoriais	84
3.4.4.	Análises estatísticas e geoestatísticas	84
3.5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	87
3.6.	CONCLUSÕES	96
3.7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
5.	APÊNDICE 1	102
6.	APÊNDICE 2	114

VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA SALINIDADE DO SOLO E DA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR EM ÁREA DE SEQUEIRO

RESUMO

A agricultura de precisão permite o manejo específico das práticas agrícolas, com maior eficiência de aplicação de insumos, diminuição dos custos de produção e redução dos impactos sobre o ambiente. O mapeamento da salinidade do solo facilita o manejo e a correção das áreas afetadas por sais. Com isso, o objetivo do trabalho foi caracterizar a variabilidade espaço-temporal da salinidade do solo e produtividade da cana-de-açúcar em área de sequeiro. O experimento foi realizado em uma área cultivada com cana-de-açúcar, localizada na Usina Santa Teresa no Município de Goiana, Zona da Mata-Norte do Estado de Pernambuco, Brasil. O lote estudado possui área de 6,5 ha, com coordenadas geográficas 07° 33' 39'' S e 35° 00' 10'' W e altitude média de 8,5 m. As amostragens do solo e da produtividade da cultura foram realizadas em 90 pontos em uma malha irregular na área experimental. Foram coletadas amostras deformadas nas camadas de solo entre as profundidades de 0-0,20m e 0,20-0,40m, com a finalidade de analisar os atributos: condutividade elétrica do extrato de saturação, potencial hidrogeniônico, cálcio, magnésio, sódio, potássio, bicarbonato, carbonato, cloreto e sulfato solúveis, além da textura do solo. Para determinação da umidade foi utilizada uma sonda TDR e para a condutividade aparente do solo foi utilizado o equipamento EM38. Foi determinada a produtividade da cana-de-açúcar. Os dados foram submetidos à estatística descritiva e análise de normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. A análise da dependência espacial foi realizada por meio da geoestatística. A CEes, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, RAS e Cl⁻ foram os atributos considerados para a delimitação de zonas homogêneas para fins de manejo sítio específico; Os mapas de variabilidade espacial da CEes, Na⁺, RAS, Cl⁻ e SO₄²⁻ apresentaram homogeneidade com o mapa topográfico e da produtividade da cana-de-açúcar e foram inversamente proporcionais aos mapas temáticos do pH; O índice pluviométrico influenciou na variabilidade espacial e temporal da produtividade e sais solúveis. A condutividade elétrica medida por indução eletromagnética demonstrou-se como uma importante ferramenta para predição dos atributos do solo. Os mapas de distribuição espacial e a correlação linear da condutividade elétrica aparente e do extrato de saturação, e umidade do solo apresentaram mesmo padrão espacial com o mapa topográfico.

Palavras Chave: manejo de sais, íons solúveis, zonas de manejo, agricultura de precisão, geoestatística, *Saccharum spp.*

SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF SOIL SALINITY AND SUGARCANE YIELD UNDER RAINFED CONDITIONS

ABSTRACT

Precision agriculture enables specific management of agricultural practices, with greater input application efficiency, lower production costs and reduction of environmental impacts. Soil salinity mapping makes it easier to manage and correct salt-affected areas. Therefore, the aim of this study was to characterize the spatiotemporal variability of soil salinity and sugarcane yield under rainfed conditions. The experiment was carried out in an area under sugarcane cultivation, located at the Usina Santa Teresa in Goiana, Zona da Mata-Norte of Pernambuco State, Brazil. The plot in study has 6.5 ha, under the following coordinates: 07° 33' 39'' S e 35° 00' 10'' W, and average altitude of 8.5 m. Soil sampling and crop yield measurements were performed on a 90-point regular grid in the experimental site. Disturbed soil was sampled from layers between the depths of 0-0.20 m and 0.20-0.40 m, in order to analyze the attributes: saturation extract electrical conductivity, hydrogenionic potential, soluble calcium, magnesium, sodium, potassium, bicarbonate, chloride and sulfate, as well as soil texture. Soil moisture content was determined using a TDR probe and soil apparent conductivity it was used an EM38 device. Sugarcane yield was calculated. Data were subjected to descriptive analyses and tested for normality using the Kolmogorov-Smirnov test. Spatial dependence analysis was performed using geostatistics. EC_{se}, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, SAR and Cl⁻ were used as attributed in order to demarcate homogeneous zones for site-specific management purposes. Spatial variability maps of EC_{se}, Na⁺, SAR, Cl⁻ and SO₄²⁻ showed similarities when compared to the topography and sugarcane yield maps, and were inversely proportional to the pH maps. Rainfall index has influenced spatial and temporal variability of soluble salts and crop yield. Electrical conductivity measured by electromagnetic induction has demonstrated to be a important tool for the prediction of soil attributes. Spatial distribution maps and linear correlation of the apparent electrical conductivity and EC_{se} and soil moisture content showed the same spatial pattern as the topography map.

Key words: salt management, soluble ions, management zones, precision agriculture, *Saccharum spp.*

1. CAPÍTULO I
REVISÃO DE LITERATURA

1.1. Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) pertence ao gênero *Saccharum*, da espécie da *officinarum* e da família *Poaceae* (Gramínea), é uma das culturas mais importantes do mundo, é típica de climas tropicais e semitropicais (Scarpari e Beauclair, 2008).

A cana-de-açúcar foi oficialmente introduzida no Brasil por Martin Afonso de Souza, em 1532 e sempre teve importância destacada na economia do país. O país não é só o maior produtor da cultura, seguido por Índia e China, como também o maior produtor de açúcar e etanol de cana-de-açúcar. Responsável por mais de 50% do açúcar comercializado no mundo, o país deve ter aumento na sua produção este ano em 5,0%. Apesar de pouco mais de 50% da produção estar concentrada em São Paulo, a cultura é cultivada em todas as regiões do país. De um modo geral, o país tem dois calendários de colheita, um para a Região Nordeste, que vai de setembro a abril e outro para o restante do país, de maio a janeiro (CONAB, 2015a).

A cultura tem um papel ambiental muito importante, uma vez que o etanol, um dos produtos da cana-de-açúcar, é uma das melhores alternativas para reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa, haja vista que a sua queima como combustível reduz em 70% a emissão de CO₂ na atmosfera em relação à gasolina (Macedo et al, 2008; Caldeira-Pires et al, 2013; CONAB, 2015a).

A cana-de-açúcar é a principal matéria-prima para a fabricação de açúcar e álcool (etanol), classificando-a como uma importante fonte de renda, geração de empregos e desenvolvimento (Camargo et al., 2010; Kirubakaran et al., 2013).

No Brasil, a área de cultivo de cana-de-açúcar é de cerca de 9 milhões de hectares, distribuídas em todos Estados produtores. O Estado de São Paulo é o maior produtor com 52% (4.685,7 mil hectares) da área plantada, e gera elevada receita para o setor agrícola, seguido por Goiás com 9,5% (854,2 mil hectares), Minas Gerais com 8,9% (805,5 mil hectares), Mato Grosso do Sul com 7,4% (668,3 mil hectares), Paraná com 7,1% (635 mil hectares), Alagoas com 4,3% (385,3 mil hectares) e Pernambuco com 2,9% (260,1 mil hectares). Estes sete Estados são responsáveis por 92,1% da produção nacional. Os outros dezesseis Estados produtores possuem áreas menores, com representações abaixo de 2,5%, totalizando 7,9% da área total do país (CONAB, 2015b).

A safra 2014/15 obteve uma produtividade e produção nacional de 70.495 kg ha⁻¹ e 634,8 milhões de toneladas, respectivamente. Do total de cana-de-açúcar produzido nesta safra, 53,8% (341.589,7 mil t) proveio de São Paulo (SP), 10,4% (66.329,4 mil t) de Goiás (GO), 9,4% (59.528,7 mil t) de Minas Gerais (MG), 6,8% (43.105,6 mil t) do Paraná (PR), 6,8%

(42.969,8 mil t) de Mato Grosso do Sul (MS), 3,5% (22.422,5 mil t) de Alagoas e 2,3% (14.730,6 mil t) de Pernambuco (PE), respectivamente, e com produtividade de 72.900, 77.650, 73.900, 67.885, 64.300, 58.201 e 56.628 kg ha⁻¹, totalizando 93,1% (CONAB, 2015b).

Durante a safra 2014/15 a produção nacional de açúcar chegou a 35,56 milhões de toneladas e de etanol a 28,66 bilhões de litros. O Estado de São Paulo destacou-se e produziu 21,92 milhões de toneladas de açúcar, o que corresponde a 61% da produção nacional total. A produção de etanol continua concentrada na Região Centro-Sul, com 92,5% do total produzido no país, principalmente em São Paulo com 14,15 bilhões de litros de etanol (49,4%), Goiás (14,6%), Minas Gerais (9,6%), Mato Grosso do Sul (8,5%), Paraná (5,6%) e Mato Grosso (4%) (CONAB, 2015b).

O Estado de Pernambuco obteve na safra 2014/15 uma produtividade média cerca de 20% menor que a média nacional (CONAB, 2015b). Com isso, diversos fatores podem interferir na produtividade e na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar que, no final, representam a integração das diferentes condições a que a cultura ficou sujeita (Gilbert et al., 2006).

Alguns dos aspectos de maior importância para se ter boa produtividade estão relacionados com as práticas de plantio, levando em consideração fatores indispensáveis à otimização da cultura (Jadoski et al., 2010).

Muitos são os fatores que podem influenciar a brotação, perfilhamento na produção, maturação e qualidade da cana-de-açúcar, sendo eles, fatores ambientais (temperatura, luminosidade e umidade do ar e do solo), genéticos e fisiológicos (variedade, idade, tamanho e sanidade das gemas) e fitotécnicos (práticas agrícolas realizadas no campo) (Serafim et al., 2012; Manhães et al., 2015).

Segundo Ayers e Westcot (1999) a cana-de-açúcar é considerada moderadamente sensível à salinidade. A salinidade do solo é, sem dúvida, um dos fatores limitantes da produção agrícola, ocorre principalmente, pela elevada evaporação e baixa precipitação, com o uso de água de irrigação com baixa qualidade, com alta concentração salina e a aplicação de quantidades excessivas de fertilizantes.

A ausência ou deficiência de drenagem, a elevação do lençol freático em decorrência da perda de água por infiltração nos canais e reservatórios e/ou acumulação de água de irrigação nas partes mais baixas do terreno, por causa do manejo inadequado, podem ocasionar a salinidade do solo (Gheyi et al., 1997; Wanderley, 2009; Dias e Blanco, 2010; Amaral Júnior, et al., 2012).

O solo é apenas um dos componentes de um conjunto complexo de fatores de produção, destacando-se pelo seu importante papel de fornecer às plantas suporte físico, água e nutrientes. Portanto, o conhecimento das características inerentes a cada solo, os chamados fatores edáficos, é importante para julgar o potencial de produção agrícola (Manhães et al., 2015).

O relevo, a geologia e a geomorfologia influenciam as características pedológicas e estabelecem implicações diretas sobre o manejo da cultura, considerando a fertilidade do solo e todos os aspectos a ela relacionados (Melo et al., 1999).

O teor de argila, areia e silte, a coesão e estabilidade do solo interferem na resistência da camada superficial ao rompimento pelos brotos primários. Também depende da estrutura e da granulometria a capacidade de retenção de água do solo, afetando a brotação (Ferreira et al., 2010; Magro et al., 2011).

A região de crescimento da raiz que vence a resistência das porções compactadas do solo é a região da coifa, constituída por um conjunto de células em processo de divisão celular e crescimento de um tecido muito sensível às barreiras físicas. Assim, é de grande importância um bom preparo do solo, no sentido de descompactar camadas que prejudicam o crescimento radicular em camadas mais profundas. Evitando-se assim um crescimento superficial das raízes (Magro et al., 2011; Montanha, 2011). Em termos de melhor tipo de solo para o cultivo da cana-de-açúcar, Townsend (2000) afirma que, são preferíveis os solos localizados em baixadas, planos, profundos, porosos e férteis sendo argilosos ou arenosos.

Segundo Magro et al. (2011), é muito importante o conhecimento sobre o desenvolvimento das raízes devido às propriedades do solo em que se desenvolvem nas diferentes idades e crescimento da planta. Os fatores do solo que mais influenciam no crescimento das raízes são os nutrientes, o teor de umidade e a aeração do solo.

A falta de umidade do solo pode prejudicar a brotação das gemas, a capacidade de perfilhamento, o crescimento e o desenvolvimento da cana-de-açúcar, assim como o excesso causado pela irrigação, má drenagem e acúmulo de água de chuvas. A umidade do solo ideal para uma boa brotação vai depender do tipo de solo e suas principais características físicas como densidade, aeração, e a condutividade hidráulica (Casagrande e Vasconcelos, 2008). Mesmo havendo condições ambientais idênticas, a brotação pode ser diferente entre as diversas cultivares de cana-de-açúcar (Casagrande, 1991).

Um solo úmido e com temperatura ideal assegura uma brotação rápida, resulta em uma boa aeração do solo é importante, já que solos mais porosos facilitam uma brotação melhor.

Solos mais porosos com uma boa aeração asseguram a brotação, podendo ser considerada segura para um cultivo satisfatório (Magro et al., 2011).

As reservas nos toletes são fundamentais para o processo de brotação, mas ao longo de seu desenvolvimento essa dependência vai diminuindo à medida que o sistema radicular se desenvolve aumentando a captação de água e nutrientes presentes no solo (Casagrande e Vasconcelos, 2008).

Na fase de rebrota a escassez de água não implica em grandes perdas de produção, porém, na fase seguinte que é o perfilhamento, a falta de água pode comprometer o rendimento final da cultura, devido a queda na população de plantas. Na fase de desenvolvimento, em solos profundos e férteis, as raízes mais profundas estão em franco crescimento, com a finalidade de assegurar o suprimento hídrico à planta, durante o período seco. Shaw e Innes (1965) afirmam que nesta fase (desenvolvimento) há uma maior exigência de água, devido a uma maior resposta das plantas quando irrigadas.

Exceto locais que utilizam irrigação para fornecimento de água às culturas, a disponibilidade de água é regida pela distribuição da chuva e pelo potencial de armazenamento de água no solo, que é condicionado pela sua capacidade de retenção e drenagem do solo. A capacidade de retenção de água de um solo é bastante variada dependendo do tipo e quantidade de porosidade do mesmo. Já a drenagem é função da porosidade e altura do lençol freático (Maule et al., 2001).

A incorporação de matéria orgânica ao solo adicionada sob a forma de resíduos orgânicos melhora as propriedades físicas e químicas do solo. De acordo com Corrêa et al. (2008) os solos cultivados com cana-de-açúcar durante longo período de tempo com sistemas de manejo com diferentes aportes de matéria orgânica, podem apresentar alterações nas propriedades físicas e químicas.

A aplicação de calcário é preponderante para o condicionamento do solo, melhorando os atributos físicos e químicos de modo a promover condições ideais de crescimento e desenvolvimento pleno da cultura da cana-de-açúcar (Ferraz et al., 2015).

Outro fator que afeta a produtividade não só da cana-de-açúcar mas de todas as culturas, é a salinidade. De acordo com Mortele et al., (2006), altas concentrações de sal no solo é um fator de estresse principalmente para espécies sensíveis a salinidade, devido a redução do potencial osmótico do solo promovendo disponibilidade da água e dificultando a absorção de água pelas raízes das plantas. Se a extração de água pelas raízes reduz-se muito, as plantas

chegam a apresentar sintomas semelhantes aos provocados por estiagem, tais como murchamento ou coloração diferenciada.

O acúmulo de sais solúveis, e especificamente de sódio, no solo causam: aumento da densidade do solo e da retenção de água e menor infiltração da água pelo excesso de íon sódio (Rhoades et al., 2000; Ayers e Westcot, 1999), diminuição da fertilidade, maior suscetibilidade a erosão e desertificação, além da contaminação do lençol freático e das reservas hídricas subterrâneas.

O excesso de sais, além de trazer prejuízos às propriedades físicas e químicas do solo, provoca a redução generalizada do crescimento das culturas (Cavalcante et al., 2010). Plantas afetadas pela salinidade apresentam desenvolvimento lento e as folhas são menores, apesar de serem mais espessas (Bresler et al., 1982), com folhas de coloração verde mais escura, podem apresentar também clorose, necrose e uma redução no desenvolvimento dos frutos.

Em termos de pH, o ideal do solo é em torno de 6,5 o que maximiza a disponibilidade de nutrientes. No entanto, as plantas podem tolerar um grau considerável de acidez ou alcalinidade do solo. A produção em condições extremas de pH em torno de 5,0 e 8,5 é viável particularmente com variedades que são mais tolerantes ao pH. Sob condições ácidas, os efeitos adversos são principalmente causados pela toxidez de alumínio, ferro e manganês, que reduzem o crescimento radicular, extração de nutrientes e água. Como resultado de um fraco enraizamento, o perfilhamento, a alongação de perfilhos e a área foliar são severamente afetados, causando a redução na produtividade de cana-de-açúcar e qualidade do caldo. Quando o pH do solo atinge níveis menores que 5,5 ocorre um declínio na disponibilidade de fósforo, magnésio, cálcio, potássio e molibdênio. Em níveis de pH acima de 7,5 ocorre deficiência de zinco, manganês e ferro (Yarabrazil, 2015).

1.2. Salinidade

A salinidade é considerada a acumulação gradativa de sais solúveis ao longo do tempo no solo. Dias et al. (2003) comentam que a origem do problema de salinidade de um solo pode estar relacionado com sua formação, devido a liberação dos constituintes das rochas durante sua intemperização. Os autores comentam que os diversos constituintes são liberados na forma mais simples.

Os solos afetados por sais são também conhecidos por solos halomórficos ou solos salinos, sódicos e salino-sódicos, são solos desenvolvidos em condições imperfeitas de drenagem, que se caracterizam pela presença de sais solúveis, sódio trocável ou ambos, em

horizontes ou camadas próximas à superfície (Pedrotti et al., 2015). A implicação prática da salinidade sobre o solo é a perda da fertilidade e a susceptibilidade a erosão, além da contaminação do lençol freático e das reservas hídricas subterrâneas.

Em regiões áridas e semiáridas o processo de salinização pode ocorrer naturalmente, por causa do baixo índice pluviométrico e a ocorrência de temperaturas elevadas, que potencializam a evaporação da água e favorecem a acumulação dos sais na superfície do solo ao longo do tempo (Andrade, 2009).

Chaves et al. (1998) afirmaram que, mesmo os solos das regiões semiáridas, apresentarem argila de atividade alta e percentuais elevados de saturação de bases, o desenvolvimento das plantas pode ser prejudicado por causa dos elevados valores de pH e a presença de sais. Quando a concentração de sais se eleva ao ponto de prejudicar o rendimento econômico das culturas, diz-se que tal solo está salinizado (Ribeiro, 2010).

O processo de salinização envolve a concentração de sais solúveis na solução do solo de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ nos horizontes do solo. Ressaltando que, os principais sais encontrados são: cloretos e sulfatos de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , sendo que, os carbonatos e nitratos são encontrados em quantidades reduzidas. Como destaque deve ser lembrado que em razão do excesso de sais e da ausência de quantidades relevantes de Na, os solos salinos são flocculados e não apresentam limitação, devido a permeabilidade. Os solos salino-sódicos são formados quando a Percentagem de Sódio Trocável (PST) atinge valores maiores ou iguais a 15%, e os níveis de salinidade permanecem altos, com uma condutividade elétrica (CE) $\geq 4,0 \text{ dS.m}^{-1}$ (Richards, 1954). O processo de solonização promove a formação de solos sódicos, e é constituído por dois subprocessos: sodificação e dessalinização. A sodificação, primeira etapa, é o processo de passagem do íon Na^+ da solução do solo para o complexo de troca, formando os solos denominados de salino-sódicos, enquanto a dessalinização, etapa final, promove a lixiviação dos sais solúveis, resultando na formação de solos unicamente sódicos (Ribeiro et al., 2003; Ribeiro, 2010).

Os sais liberados durante o processo de intemperização das rochas, dependendo da geomorfologia da região, podem ser carreados para horizontes inferiores mediante percolação ou levados a lugares distantes por escoamento superficial, conforme as condições de relevo, fluxo de água etc; no primeiro caso, os sais são depositados nas águas sub-superficiais podendo, por capilaridade, acumular-se na superfície do solo a medida em que a água for evaporada ou consumida pela planta, e o segundo fenômeno é responsável pela deposição e acumulação de sais em rios, mares, açudes e lagoas (Pizarro, 1978). A água salgada pode também vir à tona

nas nascentes, como acontece no norte das Terras Baixas Casparianas. Nesse caso, o sal origina-se em leitos marinhos que secaram em tempos geológicos anteriores e formaram grandes depósitos de sal a considerável profundidade.

De acordo com Dias et al. (2003), os mares e oceanos se constituem em depósitos naturais de sais, que são carregados pelas águas escoadas da superfície terrestre até os pontos mais baixos do relevo, acumulando-se progressivamente. Por ser excessivamente salina (aproximadamente 30 g L^{-1} ou 3 %) é provável que ela tenha sido a fonte principal de sais em solos provenientes de depósitos marinhos que se assentaram em períodos antigos.

As inundações periódicas pelas águas do mar, devido ao fenômeno de marés altas, constituem a principal fonte de sais em áreas de cota baixa; outra fonte de salinização pelas águas do mar são as pororocas, quando as águas do mar invadem os leitos dos rios, às vezes até 20 - 30 km de distância, transbordando suas margens. Quando as marés retrocedem, a água transbordada não acompanha a volta, ficando depositada em depressões, aumentando a concentração salina em áreas localizadas nas margens desses rios.

Em regiões úmidas e por se tratar de zonas com precipitações elevadas, os sais são lixiviados até os lençóis freáticos ou eliminados através das águas superficiais, com maior frequência. Enquanto, em regiões de clima árido e semiárido, por apresentarem déficit hídrico na maior parte do ano e, na maioria das vezes, os solos serem rasos ou apresentarem camadas impermeáveis, a água, que contém sais, fica sujeita aos processos de evaporação ou evapotranspiração, podendo atingir, com o tempo, níveis comprometedores para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Pizarro, 1978).

A salinização natural dos solos que pode ocorrer pela intemperização das rochas e pela deposição de sais provenientes dos oceanos pela ação das chuvas e dos ventos, a esta é denominada de salinização primária (Richards, 1954).

Segundo Ribeiro et al. (2003) a salinização induzida ou secundária ocorre quando o haloformismo é proveniente do manejo inadequado do solo e da água. Portanto a salinização ocorre em ambientes onde previamente os teores de sais tóxicos eram abaixo do limite de tolerância das plantas cultivadas, e pode ser responsável por perdas irreparáveis na qualidade de vida do solo, tornando estéreis grandes extensões de terras antes cultivadas. Este processo geralmente está associado ao desmatamento, ao excesso de água de irrigação, ao padrão de qualidade da água de irrigação abaixo do recomendado, uso de adubos químicos e sistemas de drenagem ineficientes.

Lima Júnior e Silva (2010) afirmam que, vários são os métodos existentes para avaliar a salinidade do solo, sendo a mais utilizada a metodologia americana (Richards, 1954), que analisa o potencial hidrogeniônico, a condutividade elétrica do extrato de saturação e a porcentagem de sódio trocável (PST). Para avaliar o perigo de sodificação do solo pelo uso da água de irrigação utiliza-se outro índice chamado relação de adsorção de sódio (RAS). Cruciani (2010) descreve estes métodos: O pH de uma solução aquosa é o logaritmo negativo da atividade do íon hidrogênio. É uma medida adimensional. O pH do solo é influenciado pela composição e natureza dos cátions trocáveis, composição e concentração dos sais solúveis e a presença ou ausência do gesso e carbonatos de cálcio e magnésio.

Dessa forma, em solos com pH ligeiramente alcalino, tendendo a alcalino pode haver baixa disponibilidade de fósforo, como também de micronutrientes (ferro, manganês, cobre e zinco) para as culturas (Chaves et al., 1998).

A condutividade elétrica (CE) expressa a habilidade que um meio apresenta em conduzir uma corrente elétrica. Devido ao fato de que a CE de uma solução aquosa está intimamente relacionada com a concentração total de eletrólitos dissolvidos (solutos iônicos) na solução, ela é comumente usada como uma expressão da concentração total de sais dissolvidos de uma amostra aquosa. A CE de um solo pode ser determinada por meio de um extrato de uma pasta de solo saturado ou em suspensão mais diluída.

Segundo Freire et al. (2003), a porcentagem de sódio trocável (PST) é a variável que representa a relação do sódio trocável em relação a capacidade de troca catiônica. Ressaltam ainda que a PST é usada como critério para classificação de solos afetados por sais. Quando em excesso, o sódio trocável causa dispersão da argila, e dificulta ou impede a lixiviação dos sais; além disso, um outro indicativo que expressa essa proporção é a relação de sódio trocável (RST), que é a relação entre o sódio trocável e os demais cátions trocáveis (Dias et al., 2003).

Uma outra variável recomendada é a determinação da relação de adsorção de sódio (RAS), que representa a relação relativa entre o sódio com as concentrações de Ca e Mg na solução ou no extrato de saturação. Sendo esse tipo de análise de suma importância, pois juntamente com a análise da CE serve para avaliar o sódio na solução do solo (Oliveira e Maia, 1998).

As classificações existentes para os solos afetados por sais encontram-se nas literaturas russa, francesa e americana. Contudo, a classificação mais simples e mais prática tem sido a americana (Richards, 1954).

Esta classificação é baseada na concentração de sais solúveis (expressa por meio da CE) extraídos da solução do solo e da percentagem de sódio trocável do solo (PST) e do pH. A CE indica os efeitos da salinidade sobre as plantas, enquanto que, a PST indica os efeitos do sódio sobre as propriedades do solo.

O Comitê de Terminologia da Sociedade Americana de Ciência do Solo (CTSACS) tem recomendado baixar o limite entre solos salinos e não-salinos para 2 dS m^{-1} (Bohn et al., 1985). A classificação tradicional e a proposta são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação de solos afetados por sais

Classificação	RICHARDS	CTSACS
Solos normais	CE < 4	CE < 2
	PST < 15	PST < 15
	pH < 8,5	pH < 8,5
Solos salinos	CE > 4	CE > 2
	PST < 15	PST < 15
	pH < 8,5	pH < 8,5
Solos sódicos	CE < 4	CE < 2
	PST > 15	PST > 15
	pH > 8,5	pH > 8,5
Solos salinos-sódicos	CE > 4	CE > 2
	PST > 15	PST > 15
	pH < 8,5	pH < 8,5

* CEes (dS m^{-1}), PST (%) e RAS (mmol L^{-1})^{1/2}.

O conhecimento dos efeitos dos sais nos solos e nas plantas, bem como os fenômenos envolvidos são fundamentais quando se pretende adotar práticas de manejos adequados. Deste modo, é importante estudar as interações dos sais com a planta e o solo em cultivos agrícolas e a tolerâncias das culturas à salinidade (Dias e Blanco, 2010).

Os efeitos da salinização sobre as plantas é um fenômeno extremamente complexo, envolvendo alterações morfológicas e de crescimento, além de processos fisiológicos e bioquímicos, podem ser causados pelas dificuldades de absorção de água, toxicidade de íons específicos e pela interferência dos sais nos processos fisiológicos reduzindo o crescimento, o desenvolvimento das plantas, a produtividade e qualidade, ou a perda total da produção. Os processos de crescimento são particularmente sensíveis ao efeito da salinidade, de modo que a taxa de crescimento e a capacidade fotossintética são bons parâmetros para a avaliação dos efeitos da salinidade, tal como a capacidade da planta para tolerar esse estresse (Correia et al., 2009; Dias e Blanco, 2010; Garcia et al., 2010).

Em solos salinos-sódicos o potencial osmótico tem pouco efeito sobre o movimento da massa de água no solo. Entretanto, o excesso de sais no solo exerce efeitos adversos em plantas, incluindo distúrbios osmóticos, que dificulta a absorção de água pelas raízes, toxicidade por íons e desequilíbrio nutritivo. Nesses solos o potencial osmótico é muito inferior aos encontrados na raízes das plantas. Tal fenômeno limita absorção de água pelos vegetais, visto que a influência do potencial osmótico, geralmente, não é verificada em solos não salinos, devido à baixa concentração de sais solúveis, o potencial osmótico é considerado desprezível ($\Psi_o = 0$) (Brady, 1989; Dias e Blanco, 2010; Taiz e Zeiger, 2013).

A salinidade do solo reduz a disponibilidade da água no solo, no entanto, nem todas as culturas são igualmente afetadas pelo mesmo nível de salinidade, pois algumas são mais tolerantes que outras e podem extrair água com mais facilidade. Com base na resposta aos sais, as plantas são classificadas em glicófitas e halófitas. As glicófitas representam o grupo das plantas cultivadas e, na sua maioria, são as menos tolerantes à ação dos sais, enquanto as halófitas compõem o grupo de plantas que adquirem condições fisiológicas; portanto, ajustam-se osmoticamente e sobrevivem em meio altamente salino (Dias e Blanco, 2010; Fernandes et al., 2010; Freire, et al., 2010).

Geralmente, a toxicidade é provocada principalmente pelos íons sódio, boro, bicarbonatos e cloretos, que em concentração elevada causam distúrbios fisiológicos nas plantas, entretanto, muitos outros elementos são tóxicos às plantas, mesmo em pequenas concentrações (Batista et al., 2002; Dias e Blanco, 2010).

A absorção foliar acelera a velocidade de acumulação de sais dos íons tóxicos na planta sendo, muitas vezes, a fonte principal da toxicidade. Os íons, sódio e cloreto podem, também, ser absorvidos via foliar, quando se molham durante a irrigação por aspersão e, sobretudo, durante períodos de altas temperaturas e baixa umidade. Sabe-se que algumas plantas crescem menos quando sujeitas a níveis de sulfato do que aos mesmos níveis de cloreto. Além disso, há um grave desequilíbrio nutricional em virtude da significativa alteração nos processos de absorção, transporte, assimilação e distribuição de nutrientes na planta, o excesso de Na inibe a absorção de nutrientes, como o K e Ca (Farias et al., 2009; Silva et al., 2009; Dias e Blanco, 2010).

A presença de sais de sódio também tende a restringir a taxa de mineralização do nitrogênio (N) já que, com o aumento de sua concentração no solo, em geral a mineralização do N orgânico é reduzida, afetando o crescimento da planta, pela redução do N disponível e não pelo excesso de sódio (Dias e Blanco, 2010).

O pH do solo diminui quando se aumenta a condutividade elétrica, variando de acordo com as características do solo. O efeito dos sais sobre a estrutura do solo ocorre, basicamente, pela interação eletroquímica existente entre os cátions e a argila (Dias e Blanco, 2010).

Há controvérsias sobre a eficiência da aplicação de nutrientes em excesso visando aumentar a tolerância das culturas à salinidade. De qualquer forma, é fato que plantas bem nutridas toleram mais à salinidade do que plantas submetidas à deficiência de algum nutriente e, portanto, é importante que haja um programa eficiente de manejo do solo e da adubação para que a convivência com a salinidade seja possível (Dias e Blanco, 2010).

O impacto econômico da salinização não é fácil de avaliar, por causa da relação não linear entre salinização e produtividade. Logo, a salinização pode permanecer sem ser detectada durante anos com níveis moderados de salinidade, enquanto um aumento adicional pode causar abandono da terra agrícola em poucos anos. Diante disso, uma das ferramentas mais importantes é o monitoramento da condutividade elétrica do solo em sistemas de produção, que permite de forma simples e eficiente adequações que evitem a ocorrência de processos de salinização do solo e perdas na quantidade e qualidade da produção (Queiroz et al., 2009).

O uso da geoestatística pode indicar alternativas de manejo que propiciem a minimização do efeito da variabilidade dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo sobre os cultivos, permitindo modelar e analisar a variabilidade espacial dos atributos de interesse agrícola, gerando mapas temáticos, possibilitando o manejo mais adequado para cada talhão, lote, setor, visando um incremento da produtividade, otimização na aplicação de insumos agrícolas, conseqüentemente, a redução dos custos e impactos ambientais (Souza et al., 2010).

1.3. Variabilidade espacial

A geoestatística tem como ponto de partida um conjunto de observações, de natureza quantitativa ou qualitativa, que constituem uma amostra que foi usada para compreender as propriedades do fenômeno espacial em estudo, que representa a população extraída da amostra (Yamamoto e Landim, 2013). Portanto, o estudo dos conceitos básicos geoestatísticos são importantes para melhor entendimento desta ferramenta, aplicação e tomada de decisão.

O objetivo da geoestatística é a caracterização espacial de uma variável de interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espacial com determinação das incertezas associadas. O fenômeno espacial é o conjunto de todos os valores possíveis da variável de

interesse que define a distribuição e variabilidade espacial dessa variável dentro de um dado domínio em 2D (Landim, 2006; Yamamoto e Landim, 2013).

Nos últimos anos, segundo as técnicas e conceitos utilizados na agricultura de precisão, tem-se levado em consideração, entre outros requisitos, a distância entre as amostras no estudo da variabilidade espacial e temporal dos atributos químicos, físicos do solo e os relativos às plantas, em várias formas de ocupação do solo, de maneira a representar com maior precisão e otimizar recursos e diminuir custos.

As técnicas geoestatísticas podem ser usadas para descrever padrões espaciais (variografia), para estimar valores em locais não amostrados (krigagem), permitindo a representação quantitativa da variação de um fenômeno regionalizado no espaço (Huijbregts, 1975; Vieira, 2000) e para otimizar malhas de amostragem (Andriotti, 2003). As variações não são aleatórias e, portanto, apresentam algum grau de dependência espacial e/ou temporal (Isaaks e Srivastava, 1989; Olea, 1999; Deutsch, 2002).

A hipótese intrínseca por ser menos restritiva é mais frequentemente utilizada na geoestatística por ser mais abrangente (David, 1977; Vieira, 2000), portanto, o semivariograma é mais empregado porque exige apenas a existência e estacionariedade, sem nenhuma restrição quanto à existência de variância finita (Vieira, 2000).

A verificação da presença de dependência espacial entre os pontos amostrais georreferenciados é feita por meio de semivariogramas, representado por um gráfico da função semivariância contra a sua distância. Se os valores próximos não são independentes entre si, pode-se utilizar o processo de krigagem para interpolar e estimar valores em lugares não medidos (Isaaks e Srivastava, 1989).

Por meio da análise do semivariograma, se for verificada a dependência espacial, poderão estimar valores utilizando o procedimento de interpolação conhecido como krigagem, expressando-se os resultados em forma de mapas de isolinhas e mapas de superfícies.

Segundo Landim (2006), o método fornece, além dos valores estimados, o erro associado a tal estimação, o que o distingue dos demais algoritmos à sua disposição. As formas mais usuais da Krigagem são conhecidas como simples, ordinária, universal e intrínseca. Já krigagens não-lineares são regressões lineares de alguma transformação não-linear apropriada aos dados originais, e incluem krigagem lognormal, multigaussiana, indicativa, probabilística e disjuntiva.

A maioria das propriedades do solo de interesse científico variam continuamente no tempo e espaço. Para representar as suas variações espaciais, os valores das variáveis

individuais ou os tipos de classe em locais não amostrados podem ser estimadas a partir dos dados dessas variáveis. A necessidade de variações espaciais precisamente contínuas é clara, e geoestatística é, em grande parte, a teoria relevante para enfrentar essa necessidade. Ela abrange um conjunto de técnicas estocásticas que levam em conta tanto a natureza aleatória e estruturada das variáveis espaciais, quanto a distribuição espacial dos locais de amostragem e a singularidade de qualquer observação espacial (Journel e Huijbregts, 1978).

A variabilidade espacial e temporal de atributos do solo é estudada, geralmente, utilizando as ferramentas da geoestatística. Uma das técnicas mais utilizadas tem sido a elaboração de semivariogramas, a qual indica o grau de dependência espacial ou não entre os pontos amostrados. Uma vez conhecido o modelo da dependência espacial, é possível mapear a área estudada e interpretar resultados com base na estrutura da variabilidade dos atributos avaliado (Bottega et al., 2013; Corado Neto et al., 2015).

A agricultura de precisão baseia-se na coleta de informações sobre atributos químicos, físicos e biológicos dos solos, condições da cultura, do terreno e da produtividade, associando a sua localização, as quais podem ser expressas na forma de mapas temáticos. Entender como ocorre a distribuição espacial desses atributos é importante para o estabelecimento de práticas de manejo adequadas, não somente à otimização da produtividade agrícola, mas também para a minimização de possíveis danos ambientais (Alves et al., 2013; Silva et al., 2013).

A utilização de mapas de produtividade é uma das principais ferramentas utilizadas para identificação dos fatores que afetam o desenvolvimento das culturas. Os mapas são utilizados na agricultura de precisão como uma alternativa moderna visando gerenciar a variabilidade espacial e temporal dos cultivos orientando manejo específico das práticas agrícolas, com maior eficiência de aplicação de insumos, diminuição dos custos de produção e redução dos impactos sobre o ambiente (Molin e Rabelo, 2011; Guo et al., 2012; Silva et al., 2013).

O uso da geoestatística no estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo e rendimento das culturas tem aumentado nos últimos anos (Montanari et al. 2013). De acordo com Cohen et al. (2008), as atividades antrópicas afetam a auto-organização da terra e padrões espaciais de propriedades do solo, tais como pH, níveis de nutrientes e matéria orgânica. Portanto, os estudos sobre como variabilidade espacial das propriedades do solo interferem na produtividade da cultura são indispensáveis na identificação de técnicas adequadas de manejo, otimizando os recursos e aumentando a produtividade.

A condutividade elétrica (CE) do solo tem sido proposta como uma maneira alternativa de se avaliar a variabilidade espacial deste, e a partir dela definirem-se as zonas de manejo em

uma área. A CE funciona como um indicador no monitoramento de características do solo, como salinidade, textura e estratificação, umidade, densidade, matéria orgânica e derivados, CTC, lixiviação, partição de doses de herbicidas, definição de bordas em classificação de solos, classes de drenagem, recarga de lençol freático, entre outras (Molin e Rabello, 2011).

As variações e inter-relações entre as variáveis relacionadas à salinidade, como condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) e sódio (Na^+), são complexas. Portanto, a compreensão completa, estimando e mapeamento das características espaciais da salinidade do solo facilita a avaliação precisa dos riscos (Florinsky et al., 2000) e reparação de problemas ambientais.

A análise geoestatística pode ser aplicada na tomada de decisões a respeito de monitoramento, remediação, gestão ambiental e planejamento das áreas agrícolas. As previsões espaciais, a partir de um ponto de vista econômico, tem importância especial e particular antes da transformação agrícola das terras, ou restauração ambiental, ou a seleção das espécies mais adequadas adaptadas à salinidade do solo (Juan et al., 2011).

1.4. HIPÓTESES

Diante do exposto as hipóteses do presente trabalho foram:

- A variabilidade espaço-temporal da salinidade em zona litorânea sob cultivo de cana-de-açúcar é influenciada pelas propriedades químicas do solo;
- A salinidade influencia no sistema solo-planta, contribuindo assim, para a baixa produtividade da cultura.

1.5. OBJETIVOS

Com isso, os objetivos do presente trabalho foram:

- Caracterizar a variabilidade espacial da salinidade do solo e seus efeitos sobre a variabilidade espacial da produtividade da cana-de-açúcar em área de sequeiro.
- Determinar a variabilidade espacial da condutividade elétrica (CE); do potencial hidrogeniônico (pH) e dos íons solúveis: cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), potássio (K), carbonatos, bicarbonatos, cloretos e sulfatos;
- Determinar a variabilidade espacial dos atributos físicos: textura e umidade;
- Identificar fatores químicos que mais influenciam na produtividade.

1.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, S. M.; Alcântara, G. R.; Reis, E. F.; Queiroz, D. M.; Valente, D. S. M. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 1, p. 104-114, 2013.
- Amaral Júnior, V. P.; Barreto, H. B. F.; Miranda, N. O.; Medeiros, J. F.; Lima, A. S. Parâmetros da equação de Van Genuchten e índices de solo sob lâminas crescentes de irrigação com água salina. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 8, n. 4, p. 60-65, 2012.
- Andrade, E. M. A irrigação e suas implicações sobre o capital natural em regiões áridas e semi-áridas: uma revisão. **Revista Ceres**, v. 56, n. 4, p. 390-398, 2009.
- Andriotti, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. Editora Unisinos, 2003, 165 p.
- Ayers, R.S.; Westcot, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Tradução de H. R. Gheyi, J.F. de Medeiros e F.A.V. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 29 revisado). Damasceno. 2. ed. Campina Grande: UFPB, 1999. 153 p.
- Bacchi, O. O. S. **Botânica da cana-de-açúcar**. In: Orlando Filho J., Coord. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba: IAA/ PLANALSUCAR. p. 25-37, 1983.
- Batista, M. J.; Novaes, F.; Santos, D. G.; Suguino, H. H. **Drenagem como Instrumento de Dessalinização e Prevenção da Salinização de Solos**. 2. ed., revisada e ampliada. Brasília: CODEVASF, 2002. 216 p.
- Bottega, E. L.; Queiroz, D. M.; Pinto, F. A. C.; Souza, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.
- Brady, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro, 1989. 215 p.
- Bresler, E.; Mcneal, B.L.; Carter, D.L. **Saline and sodic soils: principles dynamics - modeling**. Berlin: Springer-Verlag, 1982. 236p. (Advanced series in Agricultural Sciences, 10).

- Caldeira-Pires, A.; Vilela, F. S.; Luz, S. M.; Palma-Rojas, S.; Rodrigues, T. O.; Silvério, V. C.; Alves, A. M. Sustainability of the Biorefinery Industry for Fuel Production. **Energies**, n. 6, p. 329-350, 2013.
- Camargo, L. A.; Marques Júnior, J.; Pereira, G. T. Spatial variability of physical attributes of an Alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 617- 630, 2010.
- Casagrande, A. A.; Vasconcelos, A. C. M. **Fisiologia da parte aérea**. In: Dinardo-Miranda, L. L.; Vasconcelos, A.C M.; Andrade Landell, M. G. Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 57-78.
- Casagrande, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia de cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157 p.
- Cavalcante, L. F.; Cordeiro, J. C.; Nascimento, J. A. M.; Cavalcante, Í. H. L.; Dias, T. J. Fontes e níveis da salinidade da água na formação de mudas de mamoeiro cv. Sunrise solo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, p. 1281- 1290, 2010.
- Chaves, L. M. G.; Menino, I. B.; Araujo, I. A.; Chaves, I. De B. Avaliação da fertilidade dos solos das várzeas do Município de Sousa-PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 262-267, 1998.
- Cohen, M. J; Dunne, E. J.; Bruland, G. L. Spatial variability of soil properties in cypress domes surrounded by different land uses. **Wetlands Ecology and Management**. v. 28, p. 411–422, 2008.
- CONAB - Companhia Brasileira de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar, safra 2015/2016**. Primeiro Levantamento, v. 2, n.1, p. 1-28, Brasília, 2015a. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_13_09_39_02_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_15-16.pdf>. Consultado em 29 de jul. de 2015.

- CONAB - Companhia Brasileira de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar, safra 2014/2015**. Quarto Levantamento, v. 1, n.4, p. 1-29, Brasília, 2015b. Disponível em: < de http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_13_08_45_51_boletim_cana_portugues_-_4o_lev_-_14-15.pdf >. Consultado em 5 de Ago. de 2015.
- Corado Neto, F. C.; Sampaio, F. M. T.; Veloso, M. E. C.; Matias, S. S. R.; Andrade, F. R.; Lobato, M. G. R. Variabilidade espacial dos agregados e carbono orgânico total em Neossolo Litólico Eutrófico no município de Gilbués, PI. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 58, n. 1, p. 75-83, 2015.
- Corrêa, M. M.; Ker, J. C.; Barrón, V.; Torrent, J.; Curi, N.; Torres, T. C. P. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 297-313, 2008.
- Correia, K. G.; Fernandes, P. D.; Gheyi, H. R.; Nobre, R. G.; Santos, T. S. Crescimento, produção e características de fluorescência da clorofila a em amendoim sob condições de salinidade. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 40, n. 4. p. 514-521, 2009.
- Cruciani, D. E. **Prevenção de solos à salinização**. 2010. Disponível em: <<http://www.irrigarte.hpg.ig.com.br/Salinidade.htm>>. Acesso em 05 jan. 2016.
- David, M. **Geostatistical ore reserve estimation**. New York: Elsevier, 1977, 364 p.
- Deutsch, C.V. **Geostatistical Reservoir Modeling**, Oxford: University Press, 2002, 376 p.
- Dias, N. S.; Blanco, F. F. **Efeitos dos sais no solo e na planta**. In: Gheyi, H. R.; Dias, N. S.; Lacerda, C. F. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCT Sal, 2010. 472 p.
- Dias, N. S.; Gheyi, H. R.; Duarte, S. N. **Prevenção, manejo e recuperação dos solos afetados por sais**. Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP. Série Didática Nº13, Piracicaba, 2003, 118 p.

- Farias, S. G. G.; Santos, R. S.; Freire, A. L. O.; Silva, R. B. Estresse salino no crescimento inicial e nutrição mineral de gliricídia (*Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Steud) em solução nutritiva. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1499-1505, 2009.
- Fernandes, P. D.; Gheyi, H. R.; Andrade, E. P.; Medeiros, S. S. **Biossalinidade e produção agrícola**. In: Gheyi, H. R.; Dias, N. S.; Lacerda, C. F. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCTSal, 2010. 472 p.
- Ferraz, R. L. S.; Barbosa, M. A.; Batista, J. L.; Magalhães, I. D.; Dantas, G. F.; Franco, F. O. Calagem em cana-de-açúcar: efeitos no solo, planta e reflexos na produção. **InterfaceEHS – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 10, n. 1, 2015.
- Ferreira, R. R. M.; Tavares Filho, J.; Ferreira, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 4, p. 913-932, 2010.
- Florinsky, I.V.; Eilers, R.G.; Lelyk, G.W. Prediction of soil salinity risk by digital terrain modelling in the Canadian prairies. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 80, n. 3, p. 455–463, 2000.
- Freire, M. B. G. S.; Ruiz, H. A.; Ribeiro, M. R.; Ferreira, P. A.; Venegas, V. H. A.; Freire, F. J. Estimativa do risco de sodificação de solos de Pernambuco pelo uso de águas salinas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 227-232, 2003.
- Freire, M. B. G.; Souza, E. R.; Freire, F. J. **Fitorremediação de solos afetados por sais**. In: Gheyi, H. R.; Dias, N. S.; Lacerda, C. F. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCTSal, 2010. 472 p.
- Garcia, G. O.; Nazário, A. A.; Moraes, W. B.; Gonçalves, I. Z.; Madalão, J. C. Respostas de genótipos de feijoeiro à salinidade. **Engenharia na Agricultura**, v. 18, p. 330-338, 2010.
- Gheyi, H. R., Queiroz, J. E., Medeiros, J. F. **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada**. Campina Grande : UFPB, 1997, 383 p.
- Gilbert, R. A.; Shine Junior, J. M.; Miller, J. D.; Rice, R. W.; Rainbolt, C .R. The effect of genotype, environment and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA. **Field Crops Research**, v. 95, p. 156-170, 2006.

- Guo, W.; Maas, S. J.; Bronson, K. F. Relationship between cotton yield and soil electrical conductivity, topography, and landsat imagery. **Precision Agriculture**, v. 13, p. 678-692. 2012.
- Huijbregts, C. J. **Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data**. In: Davis, J. C. e Mccullagh, M. J. eds. Display and analysis of spatial data. New York: John Wiley, p. 38-53, 1975.
- Isaaks, E. H.; Srivastava, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**, Oxford: University Press, 1989, 561 p.
- Jadoski, C. J.; Toppa, B. E. V.; Julianetti, A.; Hulsbof, T.; Ono, E. O.; Rodrigues, J. D. **Physiology development in the vegetative stage of sugarcane. Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, v. 3, n. 2, p. 215-221, 2010.
- Journel A.G., Huijbregts C.J. **Mining Geostatistics**. London: Academic Press. 1978. 600 p.
- Juan, P.; Mateu, J.; Jordan M. M.; Mataix-Solera, J.; Meléndez-Pastor, I; Navarro-Pedreño, J. Geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil salinity. **Journal of Geochemical Exploration**. v. 108, p. 62–72, 2011.
- Kirubakaran, R.; Venkataramana, S.; Jaabir, M. S. M. Effect of ethrel and glyphosate on the ripening of sugar cane. **International Journal of Chemical Technology Research**, v. 5, p. 1927-1938, 2013.
- Landim, P. M. B. Sobre Geoestatística e mapas. **Terra e didática**. p. 19-33, 2006.
- Lima Júnior, J. A.; Silva, A. L. P. Estudo do processo de salinização para indicar medidas de prevenção de solos salinos. **Enciclopédia Biosfera**, v. 6, n. 11, p. 1-21, 2010.
- Macedo, I. C.; Seabra, J. E.; Silva, J. E. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, n. 32, p. 582 – 595, 2008.
- Magro, F. J.; Takao, G.; Camargo, P. E.; Takamatsu, S. Y. **Biometria em cana-de-açúcar. Produção de Cana-de-Açúcar**, USP, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011, 18 p.

- Manhães, C. M. C.; Garcia, R. F.; Francelino, F. M. A.; Francelino, H. O.; Coelho, F. C. Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, v. 17, n. 1, p. 163-181, 2015.
- Maule, R. F.; Mazza, J. A.; Martha Júnior, G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 2, p. 295-301, 2001.
- Melo, F. A. D.; Figueiredo, A. A.; Alves, M. C. P.; Ferreira, U. M. **Parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar em diferentes fundos agrícolas da região Norte do Estado de Pernambuco**. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 1999, p. 198-202.
- Molin, J. P.; Rabello, L. M. Estudos sobre mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 90-101, 2011.
- Montanari, R.; Panachuki, E.; Lovera, L. H.; Oliveira, I. S.; Bonini, C. S. B. Variabilidade espacial da produtividade de sorgo e atributos físicos em um Planossolo. **Revista Agro@mbiente**. v. 7, p. 252–261, 2013.
- Montanha, G. K. Agricultura de precisão reduz perdas na lavoura de cana. **Revista Campo e Negócio**, v. 9, n. 103, p. 59-73, 2011.
- Mortele, L. M.; Lopes, P. C.; Braccini, A. L.; Scapim, C. A. germinação de sementes e crescimento de plântulas de cultivares de milho-pipoca submetidas ao estresse hídrico e salino. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 28, n. 3, p.169-176, 2006.
- Olea, R. A. **Geostatistics for Engineers and Earth Scientists**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- Oliveira, M.; Maia, C. E. Qualidade físico-química da água para irrigação em diferentes aquíferos na área sedimentar do Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, p. 17-21, 1998.
- Pedrotti, A.; Chagas, R. M.; Ramos, V. C.; Prata, A. P. N.; Lucas, A. A. T.; Santos, P. B. Causas e consequências do processo de salinização dos solos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 1308-1324, 2015.

- Pizarro, F. **Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos**. Madrid: Agrícola Espanhola, 1978. 525 p
- Queiroz, S. O. P.; Testezlaf, R.; Matsura, E. E. Metodologia Para Avaliação da Salinidade do Solo em Ambiente Protegido. **Irriga**, v. 14, n. 3, p. 383-397, 2009.
- Rhoades, J. D.; Kandiah, A.; Mashali, A. M. **Uso de águas salinas para produção agrícola**. Tradução de H. R. Gheyi, J. R. de Sousa e J. E. (Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 48) . Queiroz. Campina Grande: UFPB, 2000. 117 p.
- Ribeiro, M. R. **Origem e Classificação dos Solos Afetados por Sais**. In: Gheyi, H. R.; Dias, N. S.; Lacerda, C. F. Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados. Fortaleza: INCTSal. p. 11-19, 2010.
- Ribeiro, M. R.; Freire, F. J.; Montenegro, A. A. A. **Solos halomórficos no Brasil: Ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável**. In: Curi, N.; Marques, J. J.; Guilherme, L. R. G.; Lima, J. M.; Lopes, A. S; Alvarez, V. H. (eds.). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 3, p. 165-208, 2003.
- Richards, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: United States Salinity Laboratory, US Department of Agriculture, USDA Agricultural Handbook 60, 1954, 160 p.
- Serafim, L. G. F. Stolf, R.; Silva, J. R.; Silva, L. C. F.; Maniero, M. A. **Influência do plantio mecanizado no índice de brotação da cana-de-açúcar**. In: Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Londrina, 2012.
- Shaw, M. E. A.; Innes, R.F. **The growth pattern and yield of anual cane planted at diferente seasons and the effects of nitrogen treatments**. In: Congress of the International society of sugar cane technologists. San Juan, Puerto Rico. 1965, p. 401-428.
- Silva, J. S.; Montenegro, A. A. A.; Silva, E. F. F.; Andrade, C. W. L.; Silva, J. R. L. Distribuição Espacial da Condutividade Elétrica e Matéria Orgânica em Neossolo Flúvico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 764-776, 2013.

- Souza, Z. M.; Cerri, D. G. P.; Colet, M. J.; Rodrigues, L. H. A.; Magalhães, P. S. G.; Mandoni, R. J. A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ciência Rural**, v. 40, n. 4, p. 840-847, 2010.
- Taiz, L.; Zeiger, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013, 918 p.
- Townsend, C. R. **Recomendações técnicas para o cultivo da cana-de-açúcar forrageira em Rondônia**. EMBRAPA, n. 21, p. 1-5, 2000.
- Vieira, S. R. **Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo**: In Novais, R.F.; Alvarez V., V. H.; Schaefer, C. E. G. R. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-55, 2000.
- Wanderley, R. A. **Salinização de solos sob aplicação de rejeito de dessalinizadores com e sem adição de fertilizantes**. 2009. 52 p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009.
- Yamamoto, J. K.; Landim, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2013. 215 p.
- Yarabrazil. **Nutrição de plantas: Manejo do solo e água em cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.yarabrazil.com.br/nutricao-plantas/culturas/cana-de-acucar/fatores-chave/manejo-solo-agua/>>. Acesso em: 10 de Out. 2015.

2. CAPITULO II

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA SALINIDADE DO SOLO EM UMA ÁREA CULTIVADA SOB SEQUEIRO COM CANA-DE-AÇÚCAR

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA SALINIDADE DO SOLO EM UMA ÁREA CULTIVADA SOB SEQUEIRO COM CANA-DE-AÇÚCAR

2.1. RESUMO

Nos últimos anos, segundo as técnicas e conceitos utilizados na agricultura de precisão, tem-se levado em consideração o estudo da variabilidade espacial e temporal dos atributos químicos, físicos do solo e de plantas, em várias formas de ocupação do solo, de maneira a representar com maior precisão e otimizar recursos e diminuir custos. Com isso, o objetivo do trabalho foi determinar a variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica; do potencial hidrogeniônico e dos íons solúveis: cálcio, magnésio, sódio, potássio, carbonatos, bicarbonatos, cloretos, sulfatos e relação de adsorção de sódio do solo em uma área cultivada com cana-de-açúcar. O experimento foi realizado em uma área cultivada com cana-de-açúcar, localizada na Usina Santa Teresa no Município de Goiana, Zona da Mata-Norte do Estado de Pernambuco, Brasil. O lote possui área de 6,5 ha, com coordenadas geográficas 07° 33' 39'' S e 35° 00' 10'' W e altitude média de 8,5 m. As amostragens do solo e da produtividade da cultura foram realizadas em 90 pontos em uma malha irregular na área experimental. Foram coletadas amostras deformadas nas camadas de solo entre as profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, com a finalidade de analisar os atributos: condutividade elétrica do extrato de saturação, potencial hidrogeniônico, concentrações de cálcio, magnésio, sódio, potássio, bicarbonato, carbonato, cloreto e sulfato solúveis e calcular a relação de adsorção de sódio. Os dados foram submetidos à estatística descritiva e análise de normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. A análise da dependência espacial foi realizada por meio da geoestatística. Para construção e ajuste dos semivariogramas foi utilizado o programa GS⁺. Para a construção dos mapas foi utilizado o programa SURFER 11. A CEes, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, RAS e Cl⁻ apresentaram os maiores valores de alcance de todos os atributos do solo analisados, com dependência espacial moderada e forte, e foram os atributos considerados para a delimitação de zonas homogêneas para fins de manejo sítio específico; Os mapas de variabilidade espacial da CEes, pH, Na⁺, RAS, Cl⁻ e SO₄²⁻ apresentaram homogeneidade com o mapa topográfico e da produtividade da cana-de-açúcar e foram inversamente proporcionais aos mapas temáticos do pH; O índice pluviométrico influenciou na variabilidade espacial e temporal da produtividade e sais solúveis.

Palavras Chave: manejo de sais, íons solúveis, zonas de manejo, agricultura de precisão, geoestatística, *Saccharum spp.*

SOIL SALINITY SPATIOTEMPORAL VARIABILITY IN NA RAINFED AREA UNDER SUGARCANE CULTIVATION

2.2. ABSTRACT

In recent years, according to the techniques and concepts used in precision agriculture, spatial and temporal variability of soil chemical and physical attributes and the ones related to crops have been assigned in several land use conditions, in order to represent with increased precision, resources optimization and cost reduction. Hence, the aim of this study was to determine spatiotemporal variability of electrical conductivity, hydrogenionic potential and soluble salts (calcium, magnesium, sodium, potassium, carbonates, bicarbonates, chloride, sulfates and sodium adsorption ratio) in an area under sugarcane cultivation. The experiment was carried out at Usina Santa Teresa in Goiana, Zona da Mata-Norte of Pernambuco State, Brazil. The area has 6.5 ha, under the following coordinates: 07° 33' 39'' S e 35° 00' 10'' W, and average altitude of 8.5 m. Soil sampling and crop yield measurements were performed on a 90-point regular grid in the experimental site. Disturbed soil was sampled from layers between the depths of 0-0.20 m and 0.20-0.40 m, in order to analyze the attributes: saturation extract electrical conductivity, hydrogenionic potential, soluble calcium, magnesium, sodium, potassium, bicarbonate, carbonate, chloride and sulfate, as well as calculate sodium adsorption ratio. Data were subjected to descriptive analyses and tested for normality using the Kolmogorov-Smirnov test. Spatial dependence analysis was performed using geostatistics. In order to create and fit semivariograms and create maps we used GS⁺ and SURFER 11 software, respectively. EC_{se}, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, SAR and Cl⁻ showed the highest range values of all the studied attributes, with moderate to strong spatial dependence, and they were the attributes used to demarcate homogenous zones for site-specific management purposes. Spatial variability of EC_{se}, pH, Na⁺, SAR, Cl⁻ and SO₄²⁻ maps showed similarities to the topography and sugarcane yield maps and were inversely proportional to the pH map. Rainfall index has influenced the spatiotemporal variability of yield and soluble salts.

Key words: salt management, soluble ions, management zone, precision agriculture, geostatistics, *Saccharum spp.*

2.3. INTRODUÇÃO

O Estado de Pernambuco apresentou na safra 2014/2015 uma área cultivada com cana-de-açúcar de 260,1 mil hectares, com uma produtividade de 56.628 kg ha⁻¹ e uma produção de 14.730,6 mil toneladas, produtividade esta inferior em cerca de 20% a média nacional (CONAB, 2015).

As terras agricultáveis com cana-de-açúcar no Estado de Pernambuco estão localizadas na zona litorânea, sendo a Zona da Mata Sul a principal região produtora do Estado. A produção de cana-de-açúcar nesta região se dá em solos com problemas de salinidade devido a intrusão salina ou com potencial para salinização devido a aplicação de água de irrigação de baixa qualidade. Os principais problemas causados pela salinização do solo são a redução do potencial osmótico da solução do solo, diminuindo sua disponibilidade de água, e acentuando a toxicidade do sódio e cloreto às plantas (Brady, 1989; Hasegawa et al., 2000; Dias e Blanco, 2010; Taiz e Zeiger, 2013).

O acúmulo de sais na zona radicular prejudica o crescimento e desenvolvimento das culturas, provocando um decréscimo de produtividade e, em casos mais severos, pode levar a um colapso da produção agrícola (Lima, 1998).

Segundo Ayers e Westcot (1999) a salinidade é um fator de preocupação mundial, devido ao aumento crescente de áreas de cultivo consideradas não agricultáveis, improdutiva, pois o acúmulo de sais no solo causa redução significativa da produtividade agrícola.

A adoção de práticas de manejo visando à sustentabilidade dos perímetros irrigados e o sucesso das técnicas de recuperação, com o uso e manejo dos solos salinos e sódicos está no conhecimento do processo de sua formação, bem como em compreender como tais solos interferem no desenvolvimento dos cultivos de cana-de-açúcar. O setor sucroalcooleiro necessita de ferramentas que caracterizem a variabilidade dos atributos físicos e químicos do solo e da cana-de-açúcar em escala mais detalhada que a apresentada pela carta de solos e mapas do ambiente de produção.

Nesse sentido, a agricultura atual necessita de metodologias que promovam mudanças nas técnicas de quantificação dos atributos do solo e planta, a fim de auxiliar na caracterização da variabilidade destes atributos de maneira rápida e precisa, buscando a maximização do uso do solo por meio da delimitação de zonas de manejo específico, objetivando alcançar a produtividade ótima. Porém, dentre os fatores e os custos envolvidos, a grande demanda de tempo e trabalho e a necessidade de recursos humanos com elevado potencial técnico tornam a

execução desses trabalhos mais detalhados, necessitando o uso de técnicas avançadas de amostragem e interpretação dos dados.

Tecnologias ligadas ao sensoriamento remoto, aos sistemas de informações geográficas e ao sistema de posicionamento por satélite (GPS) vêm proporcionando o desenvolvimento da agricultura de precisão, permite o manejo sítio-específico das práticas agrícolas, com maior eficiência de aplicação de insumos, diminuição dos custos de produção e redução dos impactos sobre o ambiente.

O mapeamento da produtividade é uma tecnologia já em uso, fornecendo mapas que mostram a variabilidade na produtividade da cultura. A geoestatística é uma ferramenta que possibilita o mapeamento dos atributos em cada ponto da área, possibilitando o manejo mais adequado para cada talhão, lote, setor ou direcionando para estudos das relações de causa e efeito das baixas produtividades.

Portanto, o conhecimento espacial de tais atributos permite manejar e monitorar os atributos químicos, físicos, biológicos, entre outros, buscando proporcionar incremento na produtividade da cultura, otimizar a utilização de insumos agrícolas.

Com isso, os objetivos deste trabalho foi caracterizar a variabilidade espaço-temporal da salinidade do solo em área de produção de cana-de-açúcar na Zona da Mata-Norte do Estado de Pernambuco, Brasil e determinar a variabilidade espacial da condutividade elétrica (CEes), do potencial hidrogeniônico (pH), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-), cloretos (Cl^-) e sulfatos (SO_4^{2-}).

2.4. MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1. Caracterização da área experimental

O experimento foi realizado em área da Usina Santa Teresa no Município de Goiana, na Zona da Mata Norte, Estado de Pernambuco, e cujas dimensões correspondem a 6,5 ha, e está situada nas seguintes coordenadas geográficas: 07° 34' 25'' S e 34° 55' 39'' (Figura 1) e altitude média de 8,5 m (Figura 2).

Os solos da região da área de estudo derivam do grupo Barreiras, constituídos de sedimentos de origem continental do final do Terciário, de granulometria arenosa até argilosa, caracterizados por uma alteração intensa (Brasil, 1969, 1972). O solo da área experimental é um Espodosolo Humilúvico órtico textura arenosa de acordo com a classificação da EMBRAPA (2013), cuja caracterização física para área de estudo é apresentada na Tabela 1.

A granulometria do solo (argila, silte e areia) foi determinada pelo método do densímetro, conforme descrito pela EMBRAPA (2011).

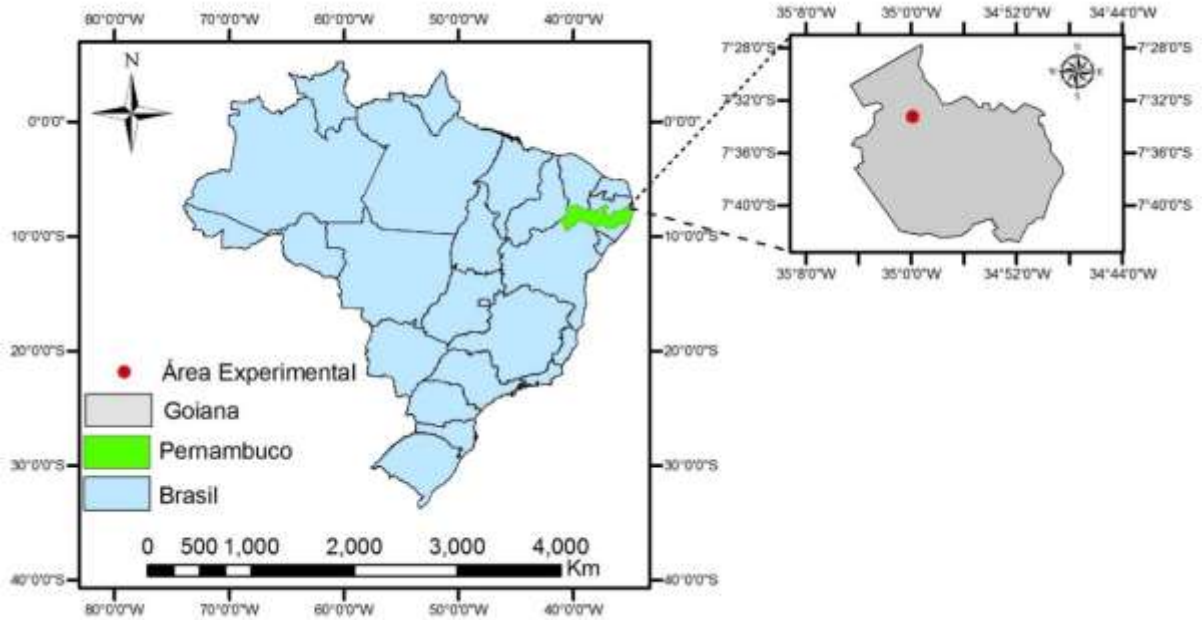


Figura 1. Mapa do Brasil com a localização do Estado de Pernambuco e em destaque, o Município de Goiana – PE, com a área experimental.

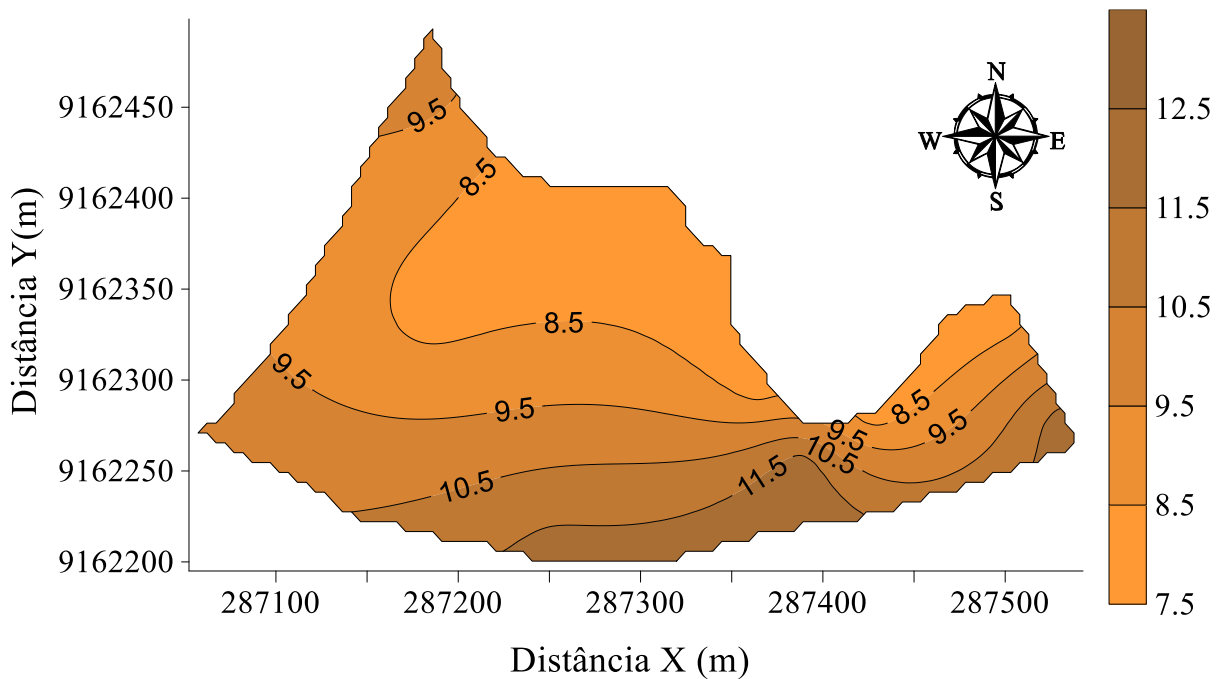


Figura 2. Mapa topográfico para área de estudo.

Tabela 1. Granulometria para o Espodossolo Humilúvico órtico presente na área de estudo.

Camada (m)	Análise granulométrica (g kg ⁻¹)		
	Argila	Silte	Areia
0,0-0,2	253,20	33,91	712,89
0,2-0,40	253,38	26,87	719,76

Os valores médios da análise de solo para os atributos químicos apresentados na Tabela 2 foram classificados, segundo Pereira (1998) para o Estado de Pernambuco, valores baixos para a soma de bases (SB), acidez potencial (H + Al³⁺), acidez trocável (Al³⁺), capacidade de troca catiônica (CTC), porcentagem de saturação por Al³⁺ (m), matéria orgânica (MO) fósforo (P) e o pH fortemente ácido. Com base nesta classificação, pode-se constatar que a área apresenta baixa fertilidade (Ribeiro et al., 1999).

Os baixos valores dos íons pode ser consequência do tipo de solo. Geralmente, os Espodossolos são muito pobres em fertilidade pela baixa reserva de nutrientes, de moderados a fortemente ácidos, normalmente com saturação por bases baixa, podendo ocorrer altos teores de alumínio extraível (EMBRAPA, 2013).

Tabela 2. Atributos químicos [Potencial hidrogeniônico (pH); soma de bases (SB); acidez potencial (H + Al³⁺); acidez trocável (Al³⁺); capacidade de troca catiônica (CTC); porcentagem de saturação por Al³⁺ (m); matéria orgânica (MO); fósforo (P)] da área de estudo.

Profundidade (m)	Horizonte	pH		SB	H+Al ³⁺	Al ³⁺	CTC	m	MO	P
		H ₂ O	KCl							
					cmol _c kg ⁻¹			%	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
0.0-0.15	A	4,9	4,30	3,20	1,30	0,20	4,50	2,00	21,00	28,00
0,15-0,3	E	4,5	4,20	1,20	1,50	0,20	3,00	8,00	14,00	16,00
0,3-0,6	Bh	4,40	4,10	0,60	0,50	0,20	1,00	20,00	1,00	2,00
0.6-1.0	Bhm1	4,30	4,00	0,50	0,60	0,00	1,00	9,00	0,50	2,00
1.0-1.2	Bhm2	4,00	3,80	0,50	1,00	0,50	0,00	55,00	5,00	2,00
1.2 +	Bs	4,00	4,00	0,50	0,40	0,70	0,60	56,00	5,00	1,00

* Espodossolo Humilúvico órtico dúrico, A franco, textura arenosa, fragpânico, imperfeitamente drenado

O clima da região, segundo a Classificação Climática de Köppen, é tropical úmido do tipo As' ou pseudotropical, que se caracteriza por ser quente e úmido, com chuvas de outono a inverno de aproximadamente 1924 mm anualmente (Figura 3), com temperaturas de 24°C.

A área de estudo apresenta grande importância no contexto regional uma vez que a cultura da cana-de-açúcar é o principal cultivo, estando localizada muitas vezes em zonas influenciadas por elevada salinidade, devido à sua proximidade com o mar, sobretudo nos

períodos de maré alta, sendo a salinidade mais acentuada nas partes mais baixas. A área está localizada à aproximadamente 10 km do Oceano Atlântico na direção leste e a 2,5 km a nordeste de um rio que deságua no oceano, sofrendo influência salina de duas fontes distintas.

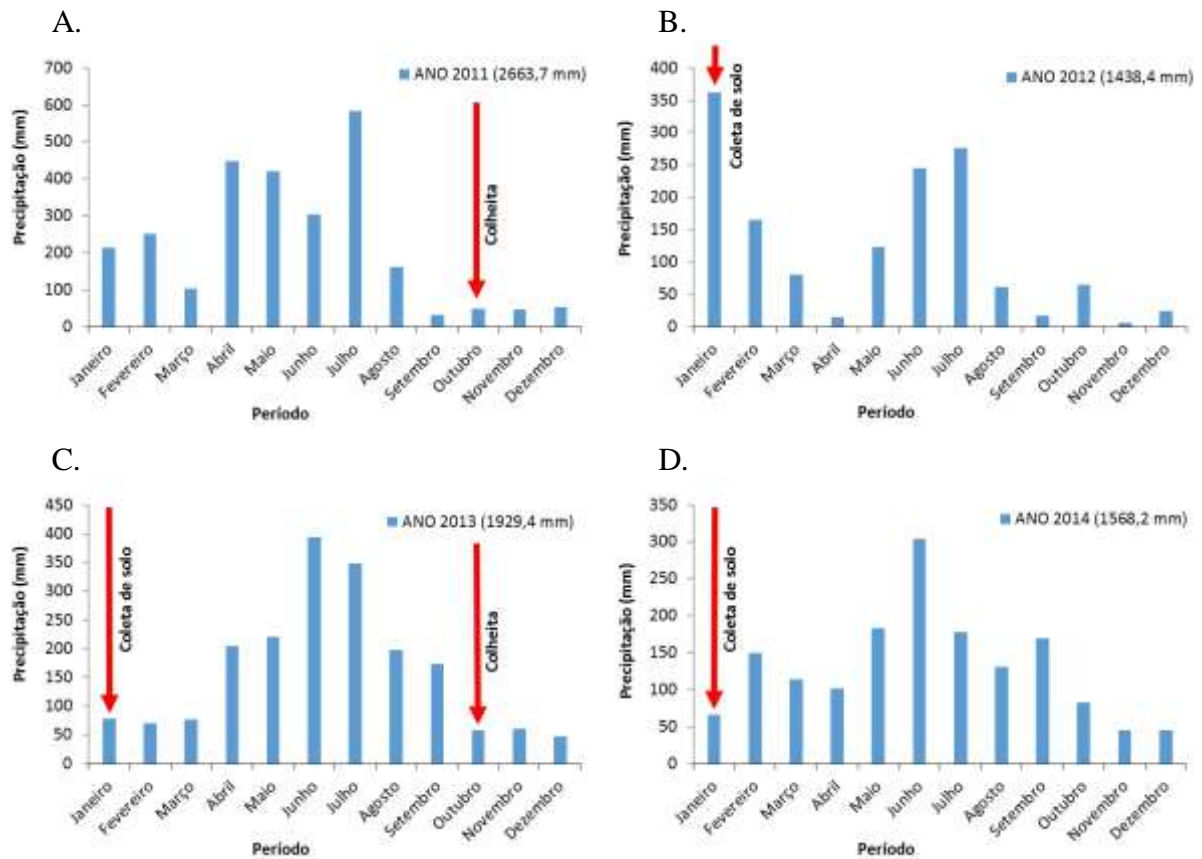


Figura 3. Precipitação do Município de Goiana – PE nos anos de (A) 2011, (B) 2012, (C) 2013 e (D) 2014.

A área em estudo vem sendo manejada nos últimos 27 anos com monocultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), cultivada em sequeiro, com queima da palha para colheita. Na safra de 2010/2011, o cultivo foi renovado, sendo a área arada, gradeada, sulcada, foi realizada a calagem e adubação (Tabela 3) e posteriormente cultivada novamente com cana-de-açúcar, variedade RB867515.

Tabela 3. Adubação do solo sob cultivo de cana-de-açúcar na área de estudo.

Data	Corte	ADUBAÇÃO	Kg ha ⁻¹
16/03/2011	Planta	NPK (14-00-18)	499,239
12/11/2011	1ª Soca	NPK (14-00-18)	500,000
23/11/2012	2ª Soca	NPK (14-00-18)	494,673

2.4.2. Amostragens

A área de estudo foi monitorada no período de três anos, abrangendo o primeiro, segundo e terceiro corte da cana-de-açúcar. Porém, o segundo corte não ocorreu na área, devido à um incêndio acidental na mesma (Tabela 4).

No primeiro semestre de cada ano foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m de profundidade, e no segundo semestre de cada ano foi amostrada a produção da cana-de-açúcar em 90 pontos georreferenciados com GPS Etrex-GARMIN, em uma malha irregular, com amostragem aleatória simples (Figura 4).

Tabela 4. Período de amostragens no primeiro, segundo e terceiro corte da cana-de-açúcar na área de estudo.

Data	Safra	Corte	Amostragens
Outubro/ 2011	2011/2012	1° Corte	Colheita (Produtividade)
Janeiro/ 2012			Coleta de solo
Outubro/ 2012	2012/2013	2° Corte	-
Janeiro/ 2013			Coleta de solo
Outubro / 2013	2013/2014	3° Corte	Colheita (Produtividade)
Janeiro/ 2014			Coleta de solo

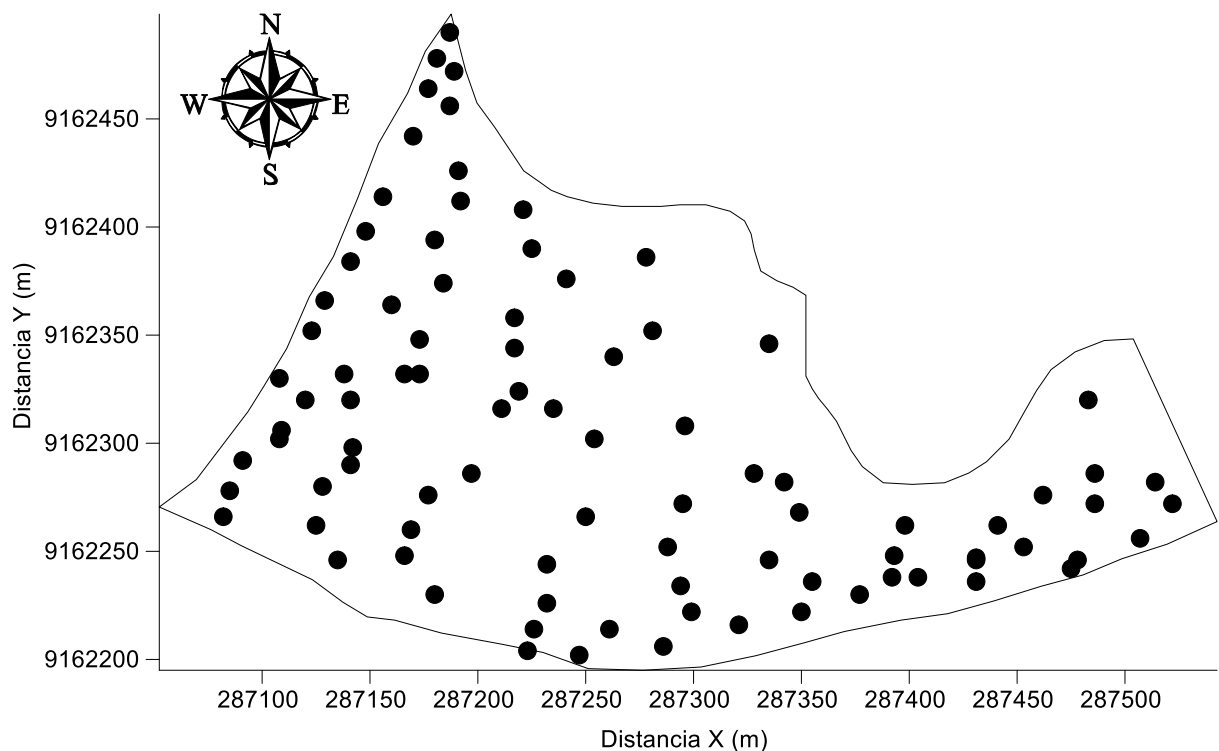


Figura 4. Localização dos pontos de amostragem na área de estudo.

Para medir a produtividade da cana-de-açúcar foi aplicado o método proposto por Gheller et al. (1999), que estima o peso total da parcela através da multiplicação do número de colmos da área amostrada pelo peso médio de dez colmos.

A produtividade da cana-de-açúcar foi amostrada em 90 pontos, em cada ponto amostral, foram escolhidas três linhas de cana-de-açúcar de 10 m de comprimento, nestas foram contados os números de colmos para o cálculo de seu peso médio. Posteriormente, foram colhidos dez colmos ao acaso dentre as três linhas de cada ponto para a pesagem.

A produtividade foi calculada a partir das Equações (1) e (2) (Gheller et al., 1999):

a) Peso médio por colmo (pmc):

$$pmc = pf/10 \quad (1)$$

em que: pf é o peso do feixe com os 10 colmos; tcolmos é o total de colmos contados nas três linhas.

b) Peso estimado no ponto amostral (pep):

$$pep = pmc \times tcolmos \quad (2)$$

A partir do peso médio estimado em cada ponto amostral foi calculado a produtividade.

2.4.3. Análises laboratoriais

As amostras de solos foram colocadas para secar ao ar, posteriormente, destorroadas, passadas na peneira de 2,00 mm (TFSA) e analisados os seguintes atributos (EMBRAPA, 2011):

As determinações dos sais solúveis [condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes); do potencial hidrogeniônico (pH) e dos íons solúveis: cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-), cloretos (Cl) e sulfatos (SO_4^{2-})] nos solos foram feitas pela medição de cátions e ânions no extrato aquoso da pasta de saturação conforme Richards (1954).

O procedimento descrito é o do extrato obtido na pasta de saturação, seguiu o método padrão, que consiste na separação do extrato da pasta utilizando-se funil de buckner com papel

de filtro, acoplado a um kitasato e uma bomba de sucção. As medições foram realizadas segundo os padrões do U.S. Salinity Laboratory Staff, apresentados por Richards (1954), sendo a salinidade expressa em condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes) em dS m^{-1} a 25°C . Para obtenção do extrato, foram colocados 400 g de solo seco ao ar e acrescentou-se água até atingir a saturação, obtendo-se, assim, a da pasta de saturação.

As variáveis foram analisadas conforme a metodologia proposta pela EMBRAPA (2011), de acordo a descrição a seguir: A CEes e o pH de pasta saturada foram determinados pelo método eletrométrico (condutivímetro) e com potenciômetro (pHmetro), respectivamente. O Na^+ e K^+ foram determinados por fotometria de chama (fotômetro de chama). O CO_3^{2-} foi determinado por acidimetria com ácido sulfúrico (H_2SO_4) em presença da fenolftaleína como indicador e o HCO_3^- foram por acidimetria com H_2SO_4 no extrato após determinação do CO_3^{2-} em presença de vermelho de metila como indicador. Para o Cl^- a determinação foi volumétrica com nitrato de prata (AgNO_3) em presença de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$) como indicador.

Foram analisados de acordo com a metodologia preconizada pela EMBRAPA (2009), o Ca^{2+} e Mg^{2+} , determinados pelo espectrofotômetro de absorção atômica e o SO_4^{2-} pelo espectrofotômetro UV.

Os valores da relação de adsorção de sódio (RAS) foram obtidos a partir dos resultados de sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) solúveis presentes no extrato de saturação do solo, calculado por meio da Equação (3):

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$
(3)

Onde:

RAS= Relação de adsorção de sódio, $(\text{mmol L}^{-1})^{1/2}$;

Na^+ = Concentração de sódio solúvel, $(\text{mmol}_c \text{L}^{-1})$;

Ca^{2+} = Concentração de cálcio solúvel, $(\text{mmol}_c \text{L}^{-1})$;

Mg^{2+} = Concentração de magnésio solúvel, $(\text{mmol}_c \text{L}^{-1})$.

2.4.4. Classificações para os solos afetados por sais

A partir dos resultados da CEes (dS m^{-1}), RAS (mmol L^{-1})^{1/2} e pH dos solos foram classificados pela metodologia padrão (Richards, 1954) e pela classificação do Comitê de Terminologia da Sociedade Americana de Ciência do Solo (CTSACS) que recomendada baixar o limite entre solos salinos e não-salinos para 2 dS m^{-1} (Bohn et al., 1985). As classificações são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Classificação de solos afetados por sais.

Classificação	RICHARDS	CTSACS
Solos normais	CEes < 4	CEes < 2
	PST < 15	PST < 15
	RAS < 13	-
	pH < 8,5	pH < 8,5
Solos salinos	CEes ≥ 4	CEes ≥ 2
	PST < 15	PST < 15
	RAS < 13	-
	pH < 8,5	pH < 8,5
Solos sódicos	CEes < 4	CEes < 2
	PST ≥ 15	PST ≥ 15
	RAS ≥ 13	-
	pH ≥ 8,5	pH ≥ 8,5
Solos salinos-sódicos	CEes ≥ 4	CE ≥ 2
	PST ≥ 15	PST ≥ 15
	RAS ≥ 13	-
	pH ≤ 8,5	pH ≤ 8,5

* CEes (dS m^{-1}), PST (%) e RAS (mmol L^{-1})^{1/2}.

2.4.5. Análises estatísticas e geoestatísticas

A estatística descritiva foi utilizada determinando-se a média, a mediana, o desvio padrão, os coeficientes de assimetria e curtose e o coeficiente de variação. Para se obter informações sobre a dispersão e a distribuição das variáveis, a análise de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov Smirnov (KS) ao nível de 5% de probabilidade, para ambas as análises foi utilizado o programa Surfer 11.0 (Golden Software, 2002).

A variabilidade das variáveis foi classificada por meio dos valores de coeficiente de variação (CV), segundo Warrick e Nielsen (1980), como baixa ($\text{CV} < 12\%$), média ($12\% < \text{CV} < 62\%$) e alta ($\text{CV} > 62\%$).

A análise da dependência espacial foi feita por meio da geoestatística (Vieira 2000, Robertson, 1998) e do ajuste de semivariogramas, com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a autocorrelação espacial entre locais vizinhos foi calculada através da semivariância $\gamma(h)$ a qual é estimada pela Equação (4):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (4)$$

em que, $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ separados por uma distância h . O semivariograma é representado pelo gráfico (h) versus h .

Para construção e ajuste dos semivariogramas foi utilizado o programa GS+. Os critérios e procedimentos para ajuste do modelo do semivariograma foram feitos conforme Vieira et al. (1983).

Foram ajustados modelos matemáticos e definidos os parâmetros para os semivariogramas: a) efeito pepita (C_0), que é o valor de γ quando $h=0$; b) alcance da dependência espacial (a), que é a distância em que $\gamma(h)$ permanece aproximadamente constante, após aumentar com o aumento de h ; c) patamar (C_0+C_1) que é o valor de $\gamma(h)$ a partir do alcance e que se aproxima da variância dos dados, se ela existir.

Após a obtenção dos semivariogramas, foram testados os modelos gaussiano, esférico e exponencial descritos pelas Equações (5), (6) e (7), respectivamente:

Modelo Esférico:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C_1 \left[1.5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 < h \leq a \\ \gamma(h) &= C_0 + C_1 & h > a \end{aligned} \quad (5)$$

Modelo Gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp^{-\left(\frac{h^2}{a^2}\right)} \right] \quad h \neq 0 \quad (6)$$

Modelo Exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp^{-\left(\frac{h}{a}\right)} \right] \quad h \neq 0 \quad (7)$$

Os dados que apresentaram tendência nos semivariogramas e mapas, foram retirados a tendência por meio das seguintes Equações (8, 9 e 10) para estimação dos resíduos:

1. Linear

$$m(x) = A_0 + A_1\chi + A_2\gamma + A_3\chi\gamma \quad (8)$$

2. Quadrática ou parabólica

$$m(x) = A_0 + A_1\chi + A_2\gamma + A_3\chi^2 + A_4\gamma^2 + A_5\chi\gamma \quad (9)$$

3. Cúbica

$$m(x) = A_0 + A_1\chi + A_2\gamma + A_3\chi^2 + A_4\gamma^2 + A_5\chi\gamma + A_6\chi^3 + A_7\gamma^3 + A_8\chi^2\gamma + A_9\chi\gamma^2 \quad (10)$$

O grau de dependência espacial (GDE) foi analisado segundo Cambardella et al. (1994), em que se preconiza a proporção em porcentagem do efeito pepita (C_0) em relação ao patamar (C_0+C_1), apresentando: (a) dependência forte < 25%; (b) dependência moderada entre 25 e 75% e (c) dependência fraca > 75%, calculado pela Equação (11):

$$GDE = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \times 100 \quad (11)$$

Para a construção dos mapas espaciais e visualização da distribuição espacial foi utilizado o programa Surfer 11.0 (Golden Software, 2002). Para efeito de comparação entre os atributos em estudo, quando detectada a presença de efeito pepita puro, foram construídos mapas de isolinhas usando os parâmetros de “default” do programa Surfer, que se baseia em um modelo de interpolação linear por krigagem.

2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da estatística descritiva apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8, permitem observar que a produtividade média da cana-de-açúcar na área de estudo foi de 83,49 t ha⁻¹ na safra 2011/2012 e 99,90 t ha⁻¹ na de 2013/2014. A produtividade na área nas safras de 2011/2012 e 2013/2014, foram cerca de 18 e 41% superior em relação à média nacional, respectivamente. Ocorrendo aumento com relação à média do Estado de Pernambuco de 55 e 76% para as safras 2011/2012 e 2013/2014, respectivamente (CONAB, 2015).

De acordo com os dados médios, o aumento da produtividade da cana-de-açúcar ocorreu, provavelmente, devido ao alto índice pluviométrico nestes 2 anos (2663,7 e 1929,4 mm). Consequentemente, na safra 2013/2014 em comparação as safras de 2011/2012 e 2012/2013, vários fatores contribuíram para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar, tais como: obteve os valores de potencial hidrogeniônico (pH) mais altos, maior concentração de sulfato (SO₄²⁻), cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺); apresentou menores concentrações de condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), sódio (Na⁺), cloreto (Cl⁻) e relação de adsorção de sódio (RAS) no solo.

Segundo a classificação de Richards (1954) e o Comitê de Terminologia da Sociedade Americana de Ciência do Solo, o solo da área é classificado como normal (sem problemas de salinidade) (Tabela 6, 7 e 8). É importante esclarecer que as amostragens foram realizadas no mês de janeiro em 3 anos consecutivos (2012, 2013 e 2014), logo após o período chuvoso (Figura 3), o que provavelmente, favoreceu à lixiviação dos sais solúveis, consequentemente, reduzindo as concentrações de CEes, Na⁺, Cl⁻ e RAS no solo da área de estudo. É que tal período a cana-de-açúcar se encontrava no estágio do ciclo de maior sensibilidade a salinidade.

De acordo com Dias et al. (2003), o pH do solo é influenciado pela composição e concentração de sais solúveis e a ausência do gesso e carbonato de cálcio e magnésio, sendo tal concentração comprovada nos resultados de análises de carbonato (CO₃²⁻), onde o mesmo foi nulo nos extratos de saturação do solo da área experimental. Os valores médios do pH foram moderadamente ácidos (Pereira, 1998; Ribeiro et al., 1999), em consequência da ausência de CO₃²⁻ e, que neste caso, o pH é menor que 8,5 (Tabela 6, 7 e 8).

Os valores de concentração do bicarbonato (HCO₃⁻) dos extratos de solução solo, apresentaram valores abaixo de 10 mmol_c L⁻¹ (Tabela 6, 7 e 8). O HCO₃⁻ não ultrapassou valores médios de 4 mmol_c L⁻¹, corroborando com os valores de pH que foram inferiores a 7, corroborando com a afirmação de Dias et al. (2003).

Tabela 6. Parâmetros da estatística descritiva dos valores da produtividade de cana-de-açúcar, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), do potencial hidrogeniônico (pH), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), bicarbonatos (HCO_3^-), cloretos (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}) e relação de adsorção de sódio (RAS) da safra 2011/2012.

Variáveis (2011)	Camada	Média	Mediana	Variância	DP	CV (%)	Assimetria	Curtose	D
Produtividade (t ha^{-1})	m	83,49	74,53	727,7	26,98	32	1,96	4,79	0,21 Ln
pH	0-0,2	5,47	5,60	0,312	0,56	10	-0,65	0,27	0,15 n
	0,2-0,4	5,54	5,57	0,231	0,48	8,6	-0,58	1,43	0,11 n
CEes (dS m^{-1})	0-0,2	0,75	0,80	0,070	0,26	35	-0,21	-1,35	0,12 n
	0,2-0,4	0,68	0,66	0,072	0,27	39	0,12	-1,33	0,10 n
Na^+ ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	0,79	0,65	0,427	0,65	83	1,53	2,51	0,16 n
	0,2-0,4	0,77	0,52	0,650	0,81	104	1,96	4,17	0,19 n
Ca^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	4,98	5,11	4,696	2,17	43	-0,09	-0,90	0,06 n
	0,2-0,4	4,30	4,19	4,056	2,01	46	0,19	-0,86	0,07 n
Mg^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	0,82	0,81	0,024	0,15	18	0,12	-0,28	0,06 n
	0,2-0,4	0,82	0,79	0,042	0,20	25	1,46	2,95	0,11 n
K^+ ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	0,87	0,56	0,604	0,78	89	1,45	1,83	0,20 n
	0,2-0,4	0,75	0,56	0,501	0,71	94	1,50	2,25	0,15 n
Cl^- ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	4,93	6,00	3,906	1,98	40	-0,36	-1,25	0,23 Ln
	0,2-0,4	4,27	4,00	3,996	2,00	46	0,15	-1,48	0,19 n
HCO_3^- ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	2,42	3,00	0,814	0,90	37	-0,45	-1,20	0,27 Ln
	0,2-0,4	2,41	2,50	0,585	0,76	31	-0,47	-0,83	0,28 Ln
SO_4^{2-} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	0,06	0,04	0,003	0,06	101	1,85	3,81	0,16 n
	0,2-0,4	0,06	0,04	0,004	0,06	97	1,66	2,44	0,20 Ln
RAS (mmol L^{-1}) ^{1/2}	0-0,2	0,48	0,42	0,155	0,39	82	1,75	4,17	0,15 n
	0,2-0,4	0,52	0,32	0,495	0,70	134	4,59	29,55	0,23 Ln

*DP = desvio-padrão. CV = coeficiente de variação. D = probabilidade de erro de 1% pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. n = normal. Ln = lognormal. DP = desvio-padrão.

Os valores de média e mediana das variáveis apresentadas na Tabela 6, 7 e 8 foram relativamente próximos, para os valores de pH, CEes, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e SO_4^{2-} nas duas camadas do solo (2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014); K^+ e RAS nas duas camadas do solo (2012/2013 e 2013/2014); RAS na camada de 0-0,2 m, Cl^- e HCO_3^- na camada de 0,2-0,4 m do solo (2011/2012); Cl^- nas duas camadas (2012/2013) e na camada de 0-0,2 m do solo (2013/2014).

A média e mediana das variáveis apresentadas nas Tabelas 6, 7 e 8, são semelhantes aos resultados encontrados em pesquisa por Souza et al. (2010), com pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ do solo nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m e a produtividade da cultura de cana-de-açúcar e corroboraram com valores próximos entre a média e mediana da CEes em pesquisa realizada

por Silva et al. (2013), no entanto, diferiram dos resultados verificados por Souza et al. (2008), onde os valores de média e mediana da CEes não foram próximos.

Tabela 7. Parâmetros da estatística descritiva dos valores da condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes); do potencial hidrogeniônico (pH) e dos íons solúveis: cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), bicarbonatos (HCO_3^-), cloretos (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}) e relação de adsorção de sódio (RAS) da safra 2012/2013.

Variáveis (2012)	Camada (m)	Média	Mediana	Variância	DP	CV (%)	Assimetria	Curtose	D
pH	0-0,2	5,08	5,16	0,297	0,54	10,72	-0,78	0,68	0,15 n
	0,2-0,4	5,18	5,32	0,304	0,55	10,65	-0,66	0,31	0,12 n
CEes (dS m^{-1})	0-0,2	0,91	0,90	0,021	0,14	15,94	0,22	0,09	0,10 n
	0,2-0,4	0,85	0,84	0,022	0,15	17,49	0,59	0,33	0,08 n
Na^+ ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	2,42	2,31	1,237	1,11	46,04	0,33	1,59	0,13 n
	0,2-0,4	2,30	2,24	0,899	0,95	41,25	0,02	1,46	0,10 n
Ca^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	3,27	3,36	1,612	1,27	38,83	-0,88	0,71	0,09 n
	0,2-0,4	3,47	3,71	1,247	1,12	32,22	-1,33	2,74	0,10 n
Mg^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	0,67	0,76	0,109	0,33	49,49	-0,66	-0,74	0,15 n
	0,2-0,4	0,78	0,84	0,093	0,31	39,06	-0,99	0,62	0,12 n
K^+ ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	2,17	2,15	0,796	0,89	41,12	-0,68	0,29	0,10 n
	0,2-0,4	1,50	1,38	0,672	0,82	54,80	0,45	-0,14	0,10 n
Cl^- ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	5,71	6,00	3,042	1,74	30,57	-2,14	5,31	0,32 Ln
	0,2-0,4	5,68	6,00	1,680	1,30	22,82	-0,83	4,27	0,19 n
HCO_3^- ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	2,65	3,00	0,767	0,88	33,08	-1,73	3,03	0,34 Ln
	0,2-0,4	2,66	3,00	0,420	0,65	24,36	-0,97	1,97	0,31 Ln
SO_4^{2-} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	0,03	0,01	0,001	0,04	142,72	3,06	10,92	0,27 Ln
	0,2-0,4	0,03	0,02	0,001	0,04	117,35	2,53	7,54	0,20 Ln
RAS ($\text{mmol L}^{-1/2}$)	0-0,2	1,81	1,72	0,447	0,67	36,90	1,24	4,40	0,09 n
	0,2-0,4	1,63	1,58	0,273	0,52	32,03	0,55	0,85	0,07 n

*DP = desvio-padrão. CV = coeficiente de variação. D = probabilidade de erro de 1% pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. n = normal. Ln = lognormal. DP = desvio-padrão.

Segundo Warrick e Nielsen (1980) os valores de coeficiente de variação (CV) dos dados da produtividade (2011/2012 e 2013/2014); CEes, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- e HCO_3^- nas duas camadas do solo (2011/2012); CEes, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- e RAS nas duas camadas do solo (2012/2013 e 2013/2014); do K^+ nas duas camadas (2012/2013) e na camada de 0,20-0,40m do solo (2013/2014), respectivamente, foram classificados como medianos ($12\% < \text{CV} < 62\%$), esses resultados corroboram com os resultados em pesquisa realizada por Santos et al. (2015) e Bottega et al. (2013) para o Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , por Machado et al. (2007) para o Ca^{2+} e Mg^{2+} , por

Souza et al. (2007) e Costa Netto (2008) para CEes apresentando média variação e diferiram da pesquisa realizada por Silva et al. (2013) com a CEes do solo, que apresentaram alta variação dos dados.

Tabela 8. Parâmetros da estatística descritiva dos valores da produtividade de cana-de-açúcar, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes); do potencial hidrogeniônico (pH) e dos íons solúveis: cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), bicarbonatos (HCO_3^-), cloretos (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}) e relação de adsorção de sódio (RAS) da safra 2013/2014.

Variáveis (2013)	Camada	Média	Mediana	Variância	DP	CV (%)	Assimetria	Curtose	D
Produtividade (t ha^{-1})	m	99,73	98,24	188,5	13,73	13,77	-0,26	0,09	0,09 n
pH	0-0,2	5,68	5,69	0,175	0,42	7,37	-0,45	-0,32	0,08 n
	0,2-0,4	5,71	5,77	0,140	0,37	6,55	-0,60	0,85	0,09 n
CEes (dS m^{-1})	0-0,2	0,70	0,68	0,034	0,19	26,36	0,53	-0,45	0,16 n
	0,2-0,4	0,64	0,65	0,007	0,08	12,82	-0,31	-0,11	0,08 n
Na^+ ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	0,68	0,56	0,083	0,29	42,67	1,98	5,22	0,19 n
	0,2-0,4	0,69	0,69	0,049	0,22	31,92	0,94	1,17	0,12 n
Ca^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	4,96	4,77	2,025	1,42	28,69	0,39	-0,84	0,18 n
	0,2-0,4	4,34	4,54	0,443	0,67	15,33	0,04	3,04	0,20 n
Mg^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	0,81	0,80	0,010	0,10	12,32	0,98	0,99	0,15 n
	0,2-0,4	0,83	0,82	0,010	0,10	12,17	0,21	-1,04	0,09 n
K^+ ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	0,46	0,43	0,101	0,32	68,66	2,50	9,11	0,17 n
	0,2-0,4	0,38	0,36	0,034	0,19	48,94	1,07	1,58	0,10 n
Cl^- ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	4,15	4,00	1,847	1,36	32,74	0,47	-0,60	0,20 Ln
	0,2-0,4	3,63	4,00	0,566	0,75	20,73	0,40	0,34	0,25 Ln
HCO_3^- ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	2,70	3,00	0,449	0,67	24,79	0,38	0,63	0,29 Ln
	0,2-0,4	2,66	3,00	0,278	0,53	19,85	-0,73	-0,63	0,39 Ln
SO_4^{2-} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,2	0,08	0,05	0,004	0,06	85,66	1,45	1,49	0,19 n
	0,2-0,4	0,09	0,06	0,004	0,06	70,90	1,16	0,77	0,15 n
RAS (mmol L^{-1}) ^{1/2}	0-0,2	0,41	0,35	0,031	0,18	43,14	1,56	2,52	0,18 n
	0,2-0,4	0,43	0,42	0,018	0,13	30,92	0,89	0,70	0,10 n

*DP = desvio-padrão. CV = coeficiente de variação. D = probabilidade de erro de 1% pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. n = normal. Ln = lognormal. DP = desvio-padrão.

Os valores de coeficiente de variação (CV) do pH de acordo com Warrick e Nielsen (1980) foram classificados como baixa variação ($\text{CV} < 12\%$), revelando assim a baixa heterogeneidade desse atributo na área. Resultados semelhantes foram encontrados por Bottega

et al. (2015), Machado et al. (2007), Artur et al. (2014) e Dias et al. (2015) encontraram CV baixos para os valores de pH.

Entretanto, os valores de CV do SO_4^{2-} nas duas camadas do solo (2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014); Na^+ , K^+ e RAS nas duas camadas do solo (2011/2012) e K^+ na camada de 0-0,20m do solo (2013/2014), respectivamente (Tabela 6, 7 e 8), apresentaram alta variação dos dados ($\text{CV} > 62\%$), corroborando com a pesquisa realizada por Artur et al. (2014) com o sódio e por Machado et al. (2007) com o K^+ ($\text{CV} > 62\%$). Todavia, os resultados diferiram da pesquisa realizada por Machado et al. (2007) com o SO_4^{2-} apresentando CV classificado como mediano ($12\% < \text{CV} < 62\%$).

A assimetria e curtose tenderam à zero (0), mostrando uma tendência simétrica para o Ca^{2+} e Mg^{2+} na camada de 0-0,2m do solo (2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014); o pH na camada de 0-0,2m, Ca^{2+} e HCO_3^- na camada de 0,20-0,40m do solo (2011/2012); pH e CEes nas duas camadas e RAS na camada de 0,20-0,40m do solo (2012/2013 e 2013/2014); Mg na camada de 0,20-0,40m e K^+ nas duas camadas solo (2012/2013); produtividade da cana-de-açúcar, Cl^- e HCO_3^- nas duas camadas do solo (2013/2014).

O pH na camada de 0,20-0,40m, CEes e Cl^- nas duas camadas e HCO_3^- na camada de 0,20-0,40m do solo (2011/2012); O Na^+ nas duas camadas, Cl^- e HCO_3^- na camada de 0,20-0,40m do solo (2012/2013); Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} na camada de 0,20-0,40m do solo (2013/2014) a assimetria tendeu à zero.

A produtividade da cana-de-açúcar (2013/2014), pH, CEes, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ nas duas camadas (2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014); Cl^- na camada de 0,20-0,40m, SO_4^{2-} e RAS na camada de 0-0,2m (2011/2012); Cl^- na camada de 0,20-0,40m e RAS nas duas camadas (2012/2013); SO_4^{2-} e RAS nas duas camadas (2013/2014) apresentaram distribuição de frequência Normal, por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) com probabilidade de erro de 1%. O carbonato foi nulo nos extratos de saturação do solo da área experimental em todas as safras.

Nas Tabelas 9, 10 e 11, pode se observar na análise geoestatística que o modelo esférico e gaussiano foram os que melhores se ajustaram aos dados. A presença do modelo gaussiano para os dados em questão pode estar associada à presença de relevo côncavo na área de estudo (Siqueira et al., 2015). Resultados semelhantes foram encontrados por Siqueira et al. (2009) estudando a variabilidade espacial da condutividade elétrica do solo em área com gradiente topográfico ajustaram o modelo esférico para a CEa na camada superficial e em profundidade.

Tabela 9. Parâmetros da análise semivariográfica dos valores da produtividade da cana-de-açúcar, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes); do potencial hidrogeniônico (pH) e dos íons solúveis: cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), bicarbonatos (HCO_3^-), cloretos (Cl^-) e sulfatos (SO_4^{2-}) e relação de adsorção de sódio (RAS) da safra 2011/2012.

Variáveis (2011)	Camada (m)	C_0	C_0+C_1	A_0 (m)	GD (%)	Classificação	Modelo	R^2
Produtividade (t ha^{-1})	-	200	580	110	34	Moderada	Gaussiano	0,950
pH	0-0,20	0,18	0,32	92	56	Moderada	Esférico	0,890
	0,20-0,40	0,14	0,23	115	60	Moderada	Esférico	0,611
CEes (dS m^{-1})	0-0,20	0,038	0,079	150	48	Moderada	Gaussiano	0,876
	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
Na^+ ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	0,251	0,456	150	55	Moderada	Gaussiano	0,990
	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
Ca^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	3,41	4,96	160	69	Moderada	Gaussiano	0,741
	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
Mg^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	0,0145	0,0295	180	49	Moderada	Gaussiano	0,808
	0,20-0,40	0,022	0,04	178	55	Moderada	Esférico	0,503
Resíduos Mg^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0,20-0,40	0,0189	0,038	109	50	Moderada	Gaussiano	0,984
	0-0,20	0,35	0,60	85	55	Moderada	Exponencial	0,576
K^+ ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
	0-0,20	2,33	4,23	175	55	Moderada	Esférico	0,900
Cl^- ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
	0-0,20	-	-	-	-	-	EPP	-
HCO_3^- ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
	0-0,20	0,0028	0,0038	123	74	Moderada	Esférico	0,717
SO_4^{2-} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
	0-0,20	0,09	0,168	150	54	Moderada	Gaussiano	0,904
RAS (mmol L^{-1}) ^{1/2}	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-

C_0 -Efeito pepita, C_0+C_1 -Patamar, A_0 -Alcance, GD-Grau de dependência, R^2 -coeficiente de determinação e EPP-Efeito Pepita Puro.

Os resultados apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11, corroboraram com os resultados encontrados por Bottega et al. (2013) e Santos et al. (2013) para o Ca^{2+} e K^+ , por Silva et al. (2013) para a CEes na camada de 0-0,20m do solo e por Machado et al. (2007) para o pH, que ajustaram os semivariogramas para o modelo esférico.

Os ajustes do modelo gaussiano apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11, corroboraram com pesquisa realizada por Bottega et al. (2013) e Artur et al. (2014) estudando a variabilidade espacial dos atributos Ca^{2+} e Mg^{2+} .

Tabela 10. Parâmetros da análise semivariográfica dos valores da condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes); do potencial hidrogeniônico (pH) e dos íons solúveis: cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), bicarbonatos (HCO_3^-), cloretos (Cl^-) e sulfatos (SO_4^{2-}) e relação de adsorção de sódio (RAS) da safra 2012/2013.

Variáveis (2012)	Camada (m)	C_0	C_0+C_1	A_0 (m)	GD (%)	Classificação	Modelo	R^2
Produtividade (t ha^{-1})	-	-	-	-	-	-	-	-
pH	0-0,20	0,119	0,269	51	44	Moderada	Esférico	0,721
	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
CEes (dS m^{-1})	0-0,20	0,0068	0,0231	124	29	Moderada	Exponencial	0,903
	0,20-0,40	0,0126	0,0254	150	50	Moderada	Gaussiano	0,868
Na^+ ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	0,4	1,03	101	39	Moderada	Esférico	0,847
	0,20-0,40	0,3	0,713	118	42	Moderada	Esférico	0,716
Ca^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	0,04	0,882	107	5	Forte	Exponencial	0,771
	0,20-0,40	0,213	0,777	200	27	Moderada	Gaussiano	0,984
Resíduos Ca^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	0,17	0,86	57	20	Forte	Gaussiano	0,923
	0,20-0,40	0,14	0,241	90	58	Moderada	Esférico	0,999
Mg^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	0,032	0,112	211	28	Moderada	Gaussiano	0,944
	0,20-0,40	0,028	0,0685	83	41	Moderada	Esférico	0,978
Resíduos Mg^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	0,15	0,85	55	17	Forte	Gaussiano	0,976
	0,20-0,40	0,037	0,0546	80	68	Moderada	Esférico	0,637
K^+ ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	-	-	-	-	-	EPP	-
	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
Cl^- ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	0,59	0,99	147	60	Moderada	Gaussiano	0,937
	0,20-0,40	0,56	1,55	177	36	Moderada	Gaussiano	0,942
Resíduos Cl^- ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	0,58	0,85	145	68	Moderada	Esférico	0,727
	0,20-0,40	0,69	1,01	165	68	Moderada	Exponencial	0,741
HCO_3^- ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	-	-	-	-	-	EPP	-
	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
SO_4^{2-} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	0,0005	0,0016	57	31	Moderada	Esférico	0,761
	0,20-0,40	0,0009	0,0016	55	56	Moderada	Esférico	0,573
RAS (mmol L^{-1}) ^{1/2}	0-0,20	0,08	0,518	81	15	Forte	Esférico	0,601
	0,20-0,40	0,04	0,295	70	14	Forte	Esférico	0,983

C_0 -Efeito pepita, C_0+C_1 -Patamar, A_0 -Alcance, GD-Grau de dependência, R^2 -coeficiente de determinação e EPP-Efeito Pepita Puro.

Os semivariogramas ajustados com o modelo exponencial (Tabelas 9, 10 e 11), corroboraram com o estudo realizado por Santos et al. (2015) com o Mg^{2+} que obtiveram os ajustes dos semivariogramas com o modelo exponencial.

Tabela 11. Parâmetros da análise semivariográfica dos valores da produtividade da cana-de-açúcar, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes); do potencial hidrogeniônico (pH) e dos íons solúveis: cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), bicarbonatos (HCO_3^-), cloretos (Cl^-) e sulfatos (SO_4^{2-}) e relação de adsorção de sódio (RAS) da safra 2013/2014.

Variáveis (2013)	Camada (m)	C_0	C_0+C_1	A_0 (m)	GD (%)	Classificação	Modelo	R^2
Produtividade (t ha^{-1})	-	168	198	70	84	Fraca	Esférico	0,650
pH	0-0,20	0,145	0,193	81	75	Moderada	Esférico	0,561
	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
CEes (dS m^{-1})	0-0,20	0,02	0,0343	121	58	Moderada	Gaussiano	0,896
	0,20-0,40	0,0042	0,0076	199	55	Moderada	Gaussiano	0,999
Resíduos CEes (dS m^{-1})	0-0,20	0,017	0,0294	130	58	Moderada	Esférico	0,813
	0,20-0,40	0,0031	0,0039	140	79	Fraca	Gaussiano	0,347
Na^+ ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	-	-	-	-	-	EPP	-
	0,20-0,40	0,0339	0,0542	146	63	Moderada	Gaussiano	0,828
Ca^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	0,55	1,85	99	30	Moderada	Exponencial	0,840
	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
Resíduos Ca^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	0,49	1,68	72	29	Moderada	Exponencial	0,800
	0-0,20	0,0051	0,0096	69	53	Moderada	Exponencial	0,74
Mg^{2+} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
	0-0,20	0,0068	0,0089	195	76	Fraca	Esférico	0,701
K^+ ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	-	-	-	-	-	EPP	-
	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
Cl^- ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	1,1	1,78	150	62	Moderada	Esférico	0,765
	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
Resíduos Cl^- ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0-0,20	1,05	1,67	105	62	Moderada	Esférico	0,561
	0-0,20	0,238	0,443	199	54	Moderada	Esférico	0,631
HCO_3^- ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
	0-0,20	-	-	-	-	-	EPP	-
SO_4^{2-} ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	0,20-0,40	-	-	-	-	-	EPP	-
	0-0,20	-	-	-	-	-	EPP	-
RAS (mmol L^{-1}) ^{1/2}	0-0,20	-	-	-	-	-	EPP	-
	0,20-0,40	0,0131	0,0190	133	69	Moderada	Gaussiano	0,580

C_0 -Efeito pepita, C_0+C_1 -Patamar, A_0 -Alcance, GD-Grau de dependência, R^2 -coeficiente de determinação e EPP-Efeito Pepita Puro.

Não houve ajuste para os semivariogramas da safra de 2011/2012 para a CEes, K^+ , Na^+ , RAS, Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} e HCO_3^- na camada de 0,20-0,40m; da safra de 2012/2013 para o pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} na camada de 0,20-0,40m, K^+ e HCO_3^- nas duas camadas; da safra de 2013/2014 para o K^+ e SO_4^{2-} nas duas camadas, Na^+ e Cl^- na camada de 0-0,20m, RAS, Mg^{2+} e pH na

camada de 0,20-0,40m (Tabelas 9, 10 e 11), pois os mesmos apresentaram efeito pepita puro, ou seja, não houve dependência espacial. Recomenda-se a redução do espaçamento nas próximas amostragens, para detectar a variabilidade espacial, corroborando com a pesquisa realizada por Machado et al. (2007) com o K^+ e por Dias et al. (2015) com estudo da dependência espacial do pH e Ca^{2+} .

Segundo Cambardella et al. (1994), os dados Ca^{2+} na camada de 0-0,20m e RAS nas duas camadas e solo (2012/2013), apresentaram forte dependência espacial, devido os valores inferiores a 25% caracterizam forte dependência, indicando elevada relação entre as amostras (Tabela 10).

Os valores de produtividade da cana-de-açúcar, pH e Mg^{2+} nas duas camadas do solo, CEes, Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} e RAS na camada de 0-0,20m do solo (2011/2012); CEes; Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- e SO_4^{2-} nas duas camadas, pH na camada de 0-0,20m e Ca^{2+} na camada de 0,20-0,40m de solo (2012/2013); CEes nas duas camadas, Ca^{2+} , Mg^{2+} e Cl^- na camada de 0-0,20m, pH, Na^+ e RAS na camada de 0,20-0,40m de solo (2013/2014) apresentaram moderada variação nos dados (25 e 75%) (Tabelas 9, 10 e 11).

A produtividade da cana-de-açúcar (2013/2014) apresentou segundo Cambardella et al. (1994) fraca dependência espacial (> 75%) (Tabela 11).

Os resultados apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11, corroboraram com os resultados encontrados por Souza et al. (2007), Souza et al. (2008) e Alves et al. (2013) que verificaram moderada dependência espacial para os valores de CEes, por Alves et al. (2013) que verificou forte dependência para a CEes na camada de 0,20-0,40m e em pesquisa realizada com Oliveira et al. (2015) que encontraram moderada dependência espacial com os valores de pH.

A variabilidade dos atributos do solo pode ser atribuída a fatores intrínsecos ou extrínsecos; no primeiro caso, predominam os fatores relacionados à formação do solo (mineralogia, granulometria), enquanto, no segundo, estão mais relacionados com as práticas de manejo adotadas.

Geralmente, uma forte dependência espacial dos atributos do solo é atribuída aos fatores intrínsecos; aos extrínsecos, uma fraca dependência (Cambardella et al., 1994; Carvalho et al., 2003).

Nas Tabelas 9, 10 e 11, pode-se verificar que os maiores valores de alcance (m) foram obtidos com a produtividade (110), pH (92 e 115) CEes (150), Na^+ (150), Ca^{2+} (160), Mg^{2+} (180 e 178), Cl^- (175), SO_4^{2-} (123) e RAS (150) da safra de 2011/2012; CEes (124 e 150), Na^+ (101

e 118), Ca^{2+} (107 e 200), Mg^{2+} (211) e Cl^- (147 e 177) da safra de 2012/2013; CEes (121 e 199), Na^+ (146), Ca^{2+} (99), Mg^{2+} (195), Cl^- (150), HCO_3^- (199) e RAS (133) da safra de 2013/2014.

A CEes, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , RAS e Cl^- apresentaram os maiores valores de alcance de todos os atributos do solo analisados, com dependência espacial moderada e forte, e são os atributos que podem considerados para a delimitação de zonas homogêneas para fins de manejo sítio específico.

Os dados de Mg^{2+} na camada de 0,20-0,40m (2011/2012); Ca^{2+} , Mg^{2+} e Cl^- nas duas camadas (2012/2013); CEes nas duas camadas, Ca^{2+} e Cl^- na camada de 0-0,20m (2013/2014) apresentaram tendência nos semivariogramas, para tanto foram retiradas as tendências, sendo calculados os seus resíduos, por meio das equações linear, quadrática e cúbica. A tendência dos dados, provavelmente ocorreu devido à direção do fluxo por causa da presença de maiores valores de umidade do solo nas partes de menor cota do terreno.

Como esperado, os semivariogramas experimentais dos dados apresentaram tendência, pois não possuem um patamar. Nesta situação foi utilizado a chamada krigagem com tendência, pois a krigagem ordinária exige que não haja tendência (ou deriva) nos dados. Para tanto, foi necessário preliminarmente remover a tendência e trabalhar com os resíduos (Vieira, 1997). Ao final, depois de obtido o mapa pela krigagem ordinária dos resíduos, foi necessário acrescentar o mapa de tendência como correção (Silva et al., 2008).

A retirada de tendência do semivariograma foi necessária e importante no presente trabalho, devido à não-estacionariedade dos dados, ou seja, os dados apresentaram aumento contínuo com a distância; esse procedimento foi imprescindível para a elaboração do semivariograma com patamar.

Para melhorar a visualização da distribuição espacial dos valores da produtividade da cana-de-açúcar, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), do potencial hidrogeniônico (pH) e dos íons solúveis: potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), bicarbonatos (HCO_3^-), cloretos (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}) e relação de adsorção de sódio (RAS), foram confeccionados mapas de isolinhas adotando-se a técnica da krigagem (Figuras 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13).

O mapa de produtividade da cana-de-açúcar da safra de 2011/2012 (Figura 5A) apresenta, na maior parte da área, valores de produtividade superiores à média nacional de 70 t ha^{-1} (CONAB, 2015), alcançando valores de até 130 t ha^{-1} , coincidindo com zona côncava e com maiores valores de umidade do solo quando comparados às demais zonas, confirmando mais uma vez a relação hídrica da cultura e a sua produtividade (Dantas et al., 2006; Siqueira

et al., 2015).

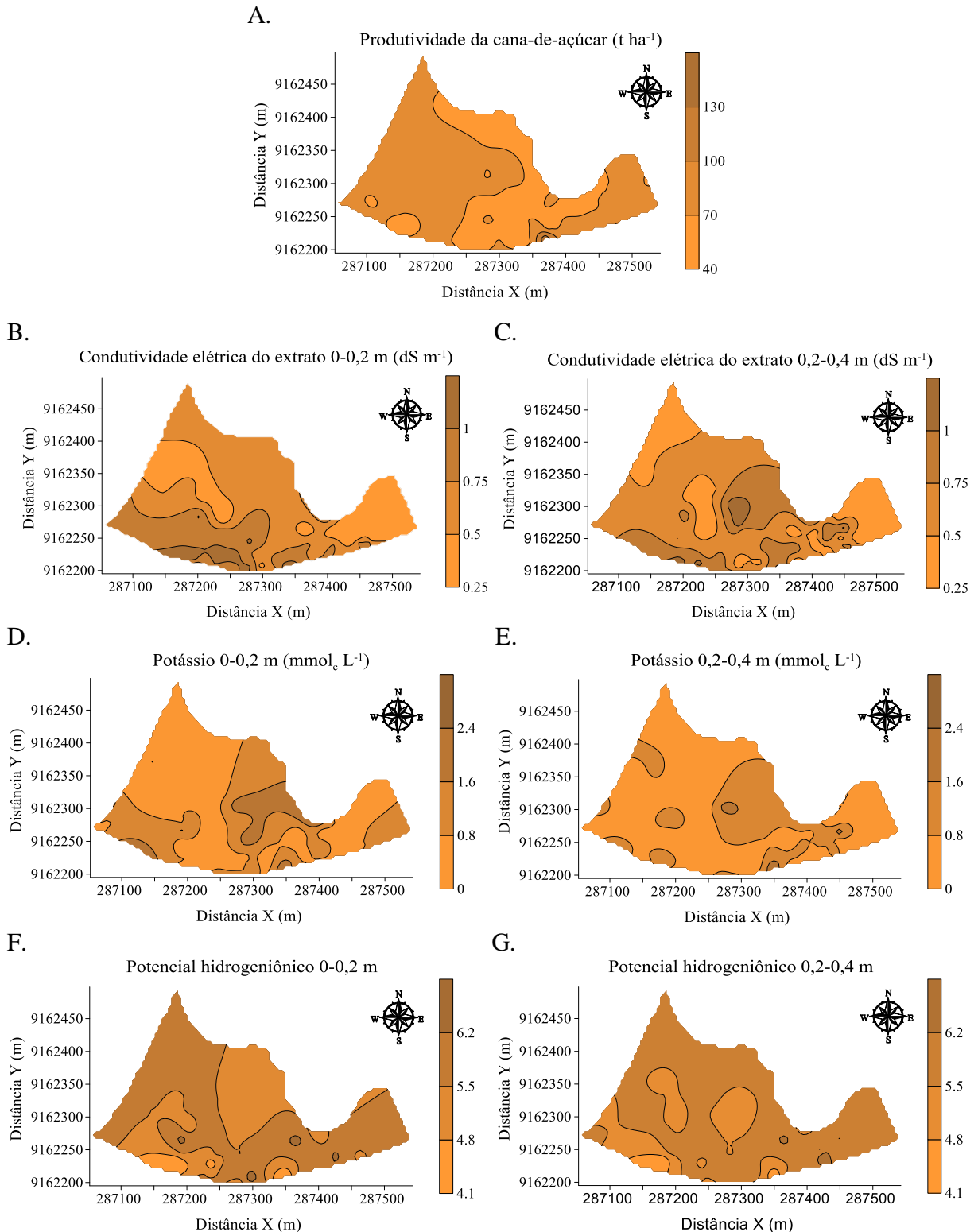


Figura 5. Mapa de isolinhas da safra 2011/2012: (A) Valores da produtividade da cana-de-açúcar; (B) condutividade elétrica do extrato saturação (CEes) na camada de 0-0,20 m e (C) de 0,20-0,40 m do solo; (D) potássio (K^+) na camada de 0-0,20 m e (E) de 0,20-0,40 m do solo; (F) potencial hidrogeniônico (pH) na camada de 0-0,20 m e (G) de 0,20-0,40 m do solo.

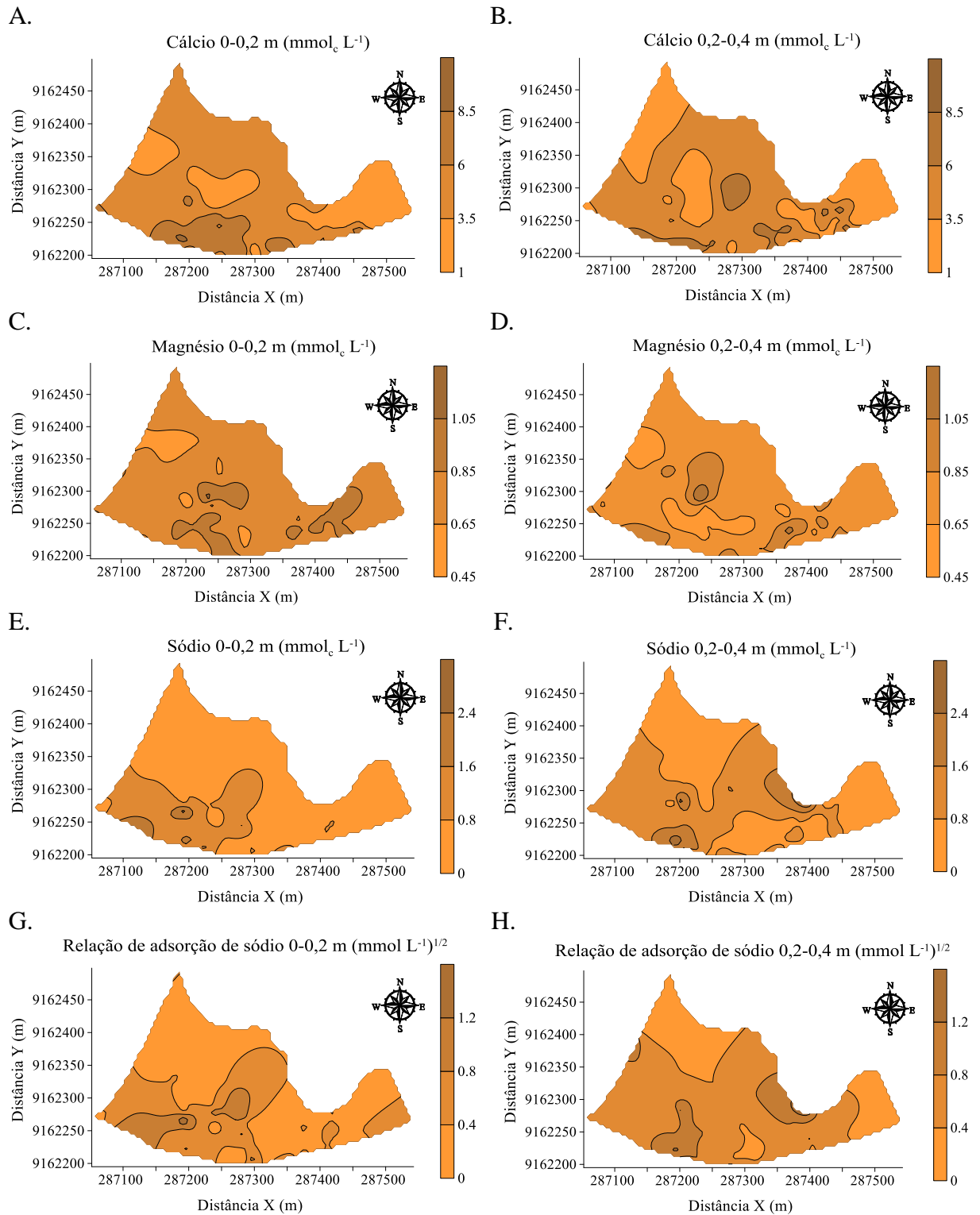


Figura 6. Mapa de isolinhas da safra 2011/2012: (A) Valores de cálcio (Ca^{2+}) na camada de 0-0,20 m e (B) de 0,20-0,40 m do solo; (C) magnésio (Mg^{2+}) na camada de 0-0,20 m e (D) de 0,20-0,40 m do solo; (E) sódio (Na^+) na camada de 0-0,20 m e (F) de 0,20-0,40 m do solo; (G) e relação de adsorção de sódio (RAS) na camada de 0-0,20 m e (H) de 0,20-0,40 m do solo.

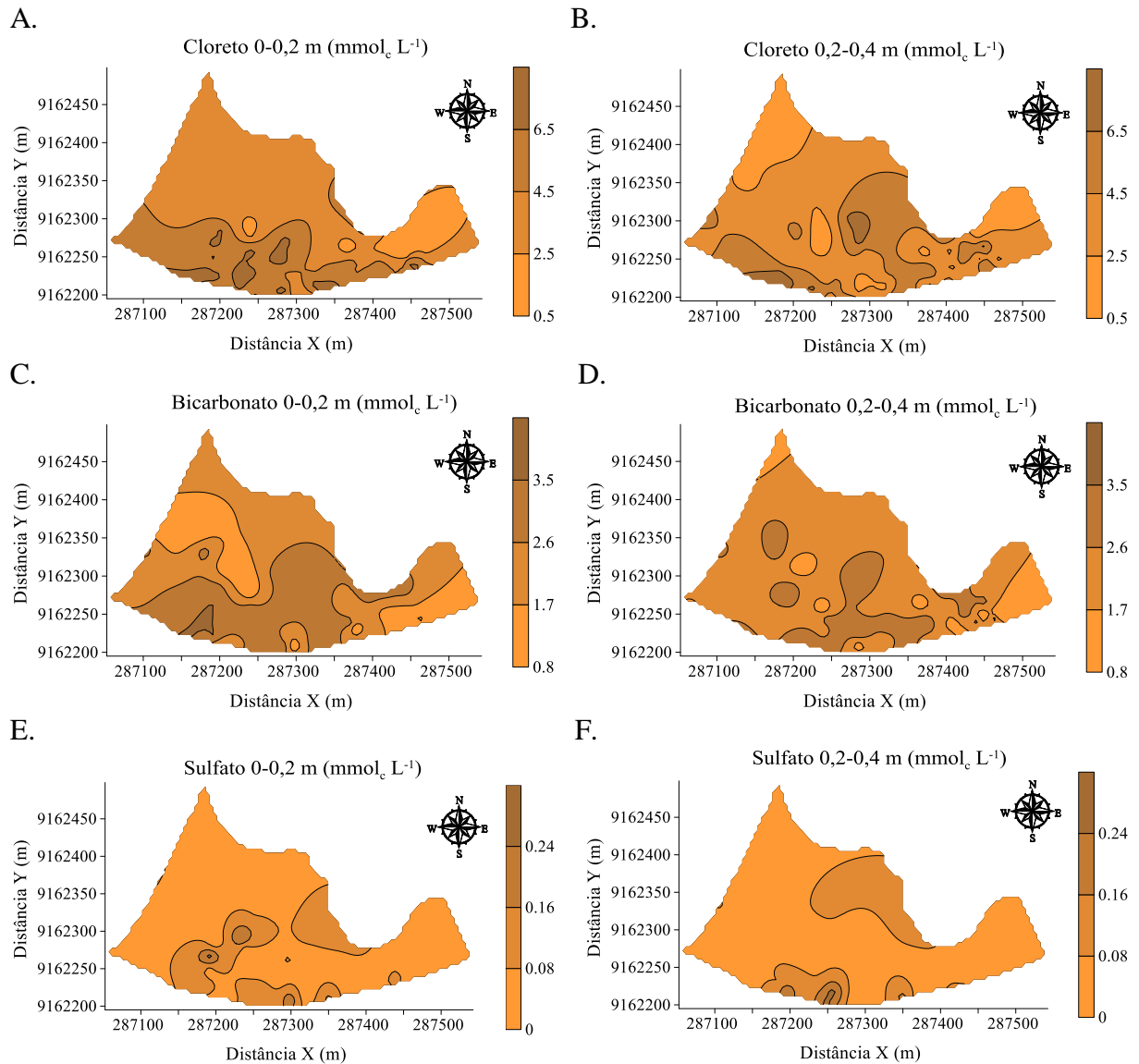


Figura 7. Mapa de isolinhas da safra 2011/2012: (A) Valores de cloreto (Cl⁻) na camada de 0-0,20 m e (B) de 0,20-0,40 m do solo; (C) bicarbonato (HCO₃⁻) na camada de 0-0,20 m e (D) de 0,20-0,40 m do solo; (E) sulfato (SO₄²⁻) na camada de 0-0,20 m e (F) de 0,20-0,40 m do solo.

Observou-se que na região onde a área apresenta sua menor largura e sua maior cota topográfica (Figura 2) estão localizados os menores valores de produtividade (Figura 5A), havendo menores valores de produtividade também na região superior esquerda do mapa onde ocorrem as menores cotas topográficas, evidenciando que o excesso de umidade também influenciou a produtividade de cana-de-açúcar (Artur et al., 2014; Siqueira et al., 2015).

A análise do padrão espacial dos mapas de variabilidade da safra de 2011/2012, entre a produtividade (Figura 5A), CEes (Figuras 5B e 5C), K⁺ (Figuras 5D e 5E), Na⁺ (Figuras 6E e 6F), RAS (Figuras 6G e 6H), Cl⁻ (Figuras 7A e 7B) e SO₄²⁻ (Figuras 7E e 7F) nas duas camadas,

a maior concentração de sais pode ser observada na região de menor cota da área (Figura 2), nessa mesma área ocorreu redução na produtividade. Os mapas de variabilidade espacial confirmam a relação inversamente proporcional da produtividade e topografia da área com os sais solúveis (CEes, K^+ , Na^+ , RAS, Cl^- e SO_4^{2-}) e o mesmo padrão espacial é representado nos mapas de isolinhas.

Os valores da RAS aumentaram com os da CEes do solo, embora os valores estejam baixos, o que não caracteriza o solo como sódico (Richards, 1954). Este é um fator preocupante, pois, a depender do manejo e drenagem da área, poderão promover a salinização e sodificação do solo, tornando-o impróprio para a agricultura, além de contribuir para a salinidade das águas do lençol freático. Os resultados encontrados nas Tabelas 9, 10 e 11, corroboraram com pesquisa realizada por Silva et al. (2014) com a CEes e RAS do extrato de saturação do solo sob diferentes níveis de salinidade.

Os resultados apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11, com a RAS e o Na^+ , corroboraram com resultados de Freire et al. (2003), nos quais o aumento da RAS ocorreu em função dos teores de Na^+ na solução do solo em relação aos outros cátions. O Na^+ pode ter promovido a dispersão dos colóides presentes nos solos e conseqüentemente a movimentação no perfil, obstruindo poros e dificultando a condução de ar e água e degradação das propriedades físicas dos solos, na cota baixa da área reduzindo a produtividade da cana-de-açúcar da safra de 2011/2012 e 2012/2013 (Figuras 5 e 11).

Os mapas de pH da safra de 2011/2012 (Figuras 5F e 5G) foram inversamente proporcionais aos da produtividade da cana-de-açúcar (Figura 5A), CEes (Figuras 5B e 5C), K^+ (Figuras 5D e 5E), Ca^{2+} (Figuras 6A e 6B), Mg^{2+} (Figuras 6C e 6D) e SO_4^{2-} (Figuras 7E e 7F), ou seja, quanto mais alcalino o pH do solo, menor será a concentração destes atributos.

O pH do solo diminuiu quando se aumentou a condutividade elétrica, variando de acordo com as características do solo (Dias e Blanco, 2010). Resultados semelhantes foram encontrados por Cerri e Magalhães et al. (2012) estudando os atributos químicos (pH, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) e a produtividade de cana-de-açúcar.

A similaridade no padrão de distribuição espacial para o Ca^{2+} , Mg^{2+} e SO_4^{2-} é confirmada nos mapas da safra de 2011/2012 e nos mapas de isolinhas do Ca^{2+} (Figuras 6A e 6B) e Cl^- (Figuras 7A e 7B) pode ser verificada a mesma distribuição espacial.

Não houve relação espacial entre os mapas de HCO_3^- da safra de 2011/2012 (Figuras 7C e 7D) e de 2012/2013 com os demais atributos estudados (Figuras 5, 6 e 7).

Pode-se observar com a variabilidade espacial o mesmo padrão nos mapas de isolinhas

da safra de 2012/2013 da CEes (Figuras 8A e 8B), K^+ (Figuras 8C e 8D), Ca^{2+} (Figuras 6A e 6B), Na^+ (Figuras 9E e 9F), RAS (Figuras 9G e 9H), Cl^- (Figuras 10A e 10B) e SO_4^{2-} (Figuras 10E e 10F) nas duas camadas apresentaram homogeneidade com o mapa topográfico. A distribuição espacial da safra de 2012/2013 apresentou o mesmo padrão espacial da safra de 2011/2012.

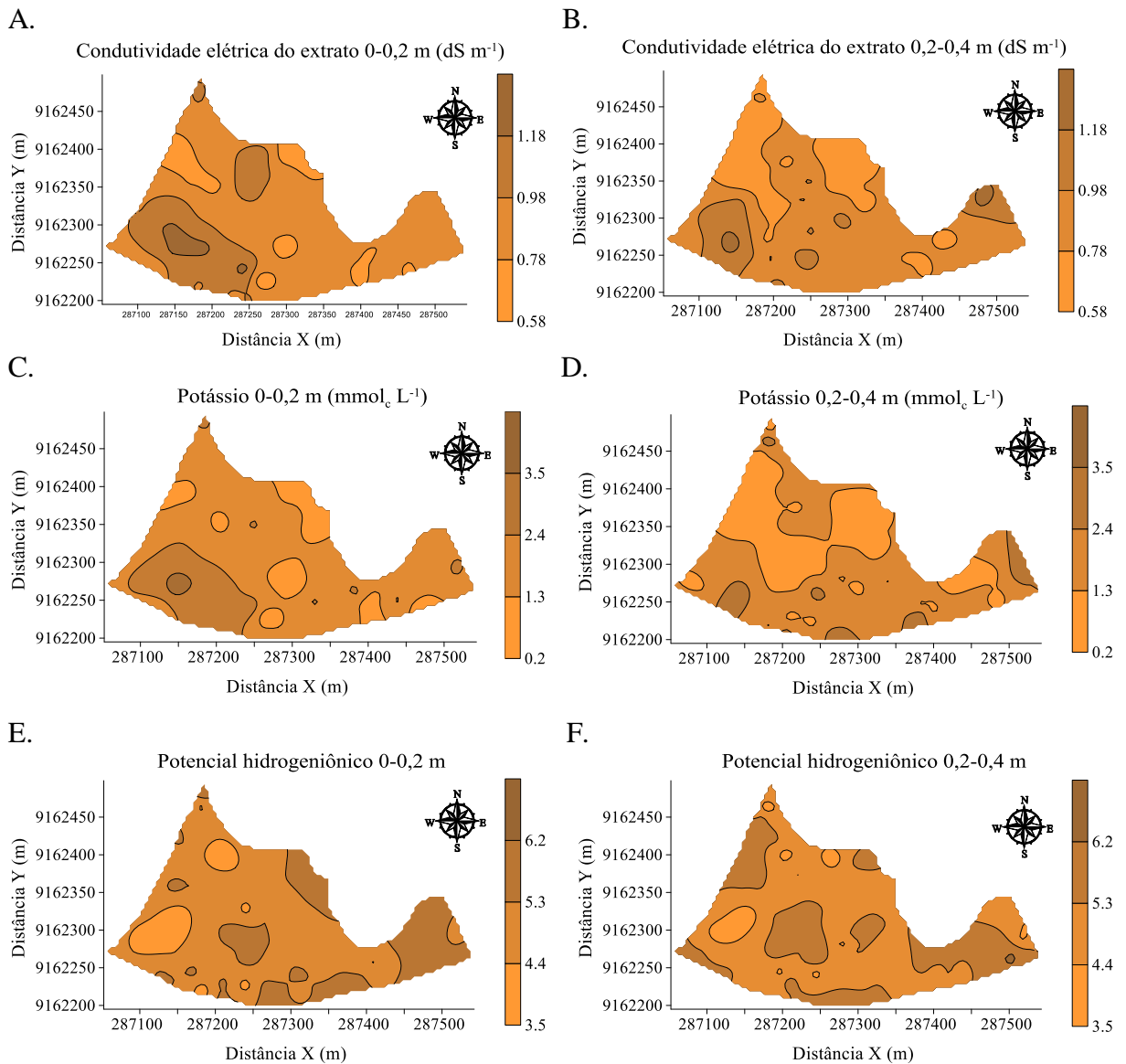


Figura 8. Mapa de isolinhas da safra 2012/2013: (A) Valores de condutividade elétrica do extrato saturação (CEes) na camada de 0-0,20 m e (B) de 0,20-0,40 m do solo; (C) potássio (K^+) na camada de 0-0,20 m e (D) de 0,20-0,40 m do solo; (E) potencial hidrogeniônico (pH) na camada de 0-0,20 m e (F) de 0,20-0,40 m do solo.

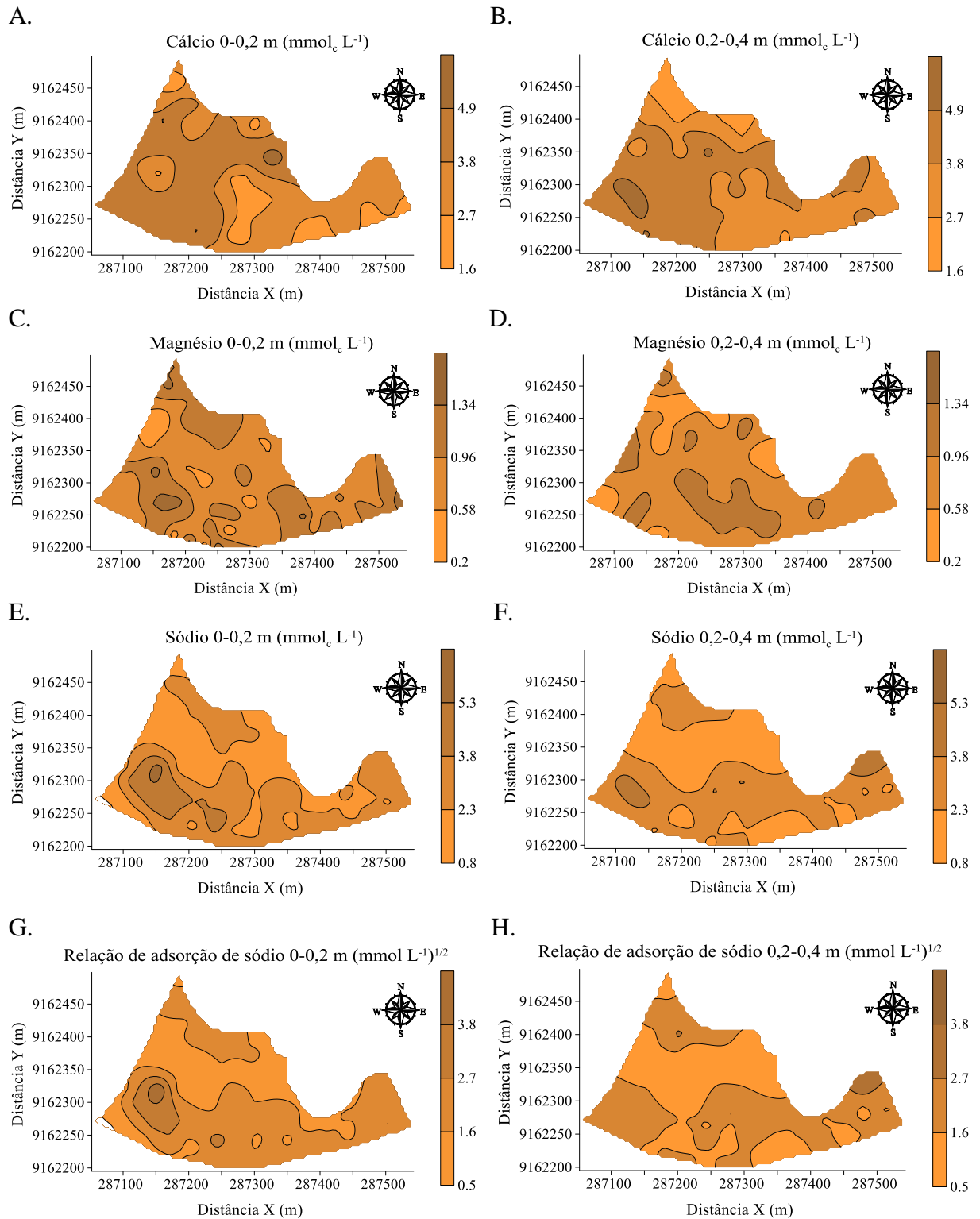


Figura 9. Mapa de isolinhas da safra 2012/2013: (A) Valores de cálcio (Ca^{2+}) na camada de 0-0,20 m e (B) de 0,20-0,40 m do solo; (C) magnésio (Mg^{2+}) na camada de 0-0,20 m e (D) de 0,20-0,40 m do solo; (E) sódio (Na^+) na camada de 0-0,20 m e (F) de 0,20-0,40 m do solo; (G) e relação de adsorção de sódio (RAS) na camada de 0-0,20 m e (H) de 0,20-0,40 m do solo.

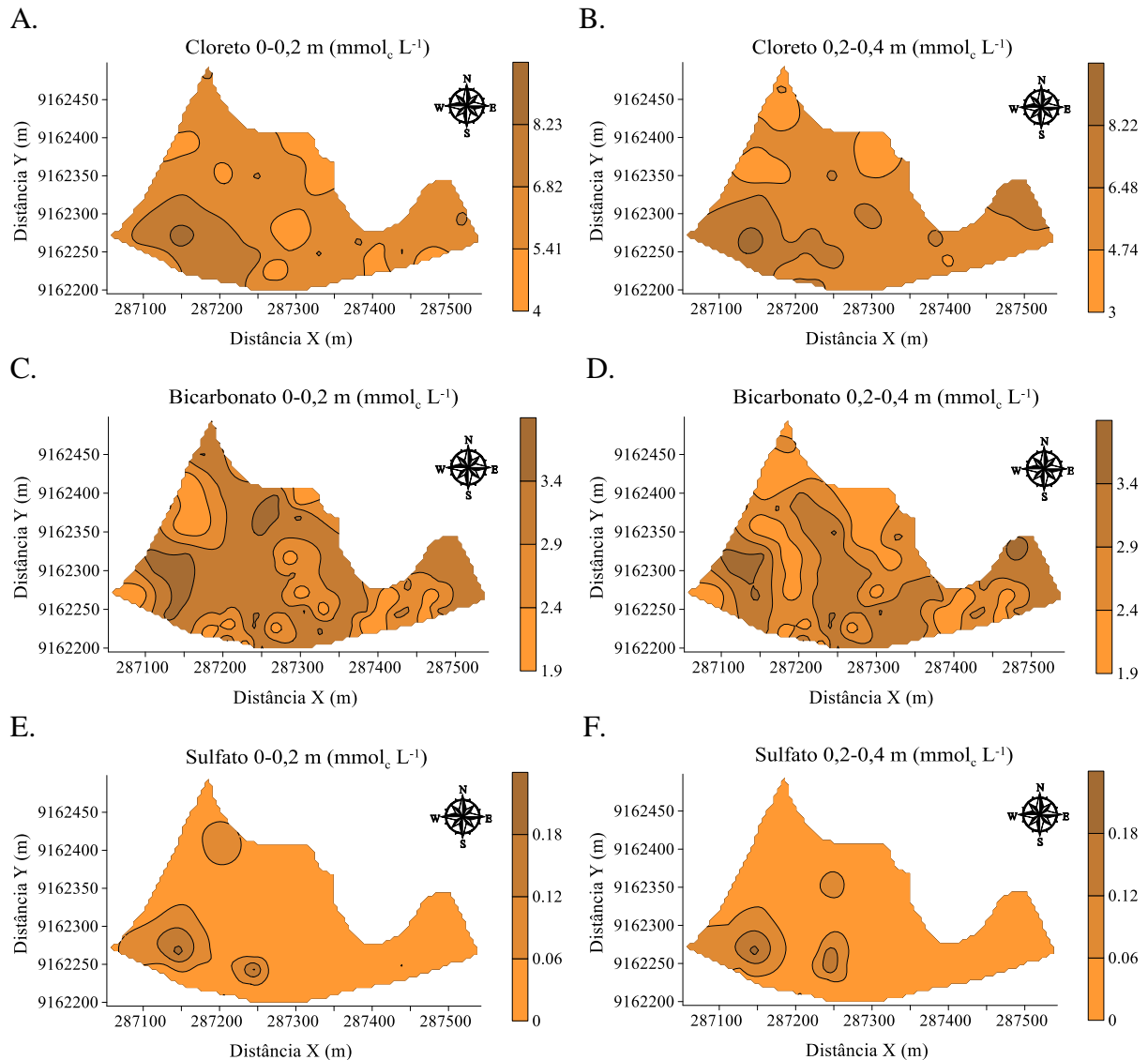


Figura 10. Mapa de isolinhas da safra 2012/2013: (A) Valores de cloreto (Cl^-) na camada de 0-0,20 m e (B) de 0,20-0,40 m do solo; (C) bicarbonato (HCO_3^-) na camada de 0-0,20 m e (D) de 0,20-0,40 m do solo; (E) sulfato (SO_4^{2-}) na camada de 0-0,20 m e (F) de 0,20-0,40 m do solo.

Verificou-se a mesma distribuição espacial nos mapas da safra de 2012/2013 do Mg^{2+} (Figuras 9C e 9D), Na^+ (Figuras 9E e 9F) e RAS (Figuras 9G e 9H). Não foi possível descrever uma relação espacial entre os mapas de pH (Figuras 8E e 8F) da safra de 2012/2013 e demais atributos estudados (Figuras 8, 9 e 10).

A distribuição espacial dos mapas da safra de 2013/2014 da CEes (Figuras 11B e 11C), Ca^{2+} (Figuras 12A e 12B), do Mg^{2+} (Figuras 12C e 12D), Cl^- (Figuras 13A e 13B) e HCO_3^- (Figuras 13C e 13C) nas duas camadas pode ser observado o mesmo padrão espacial com o mapa topográfico e maior concentração de sais na parte de menor cota da área (Figura 2), na

mesma ocorreu redução na produtividade de cana-de-açúcar da safra de 2013/2014. Pode ser observado nos mapas de isolinhas de 2013/2014 o mesmo padrão espacial das safras anteriores.

Os mapas do pH (Figuras 11F e 11G) da safra de 2013/2014 foram inversamente proporcionais aos da produtividade da cana-de-açúcar (Figura 11A), CEes (Figuras 11B e 11C), Ca^{2+} (Figuras 12A e 12B), do Mg^{2+} (Figuras 12C e 12D), Cl^- (Figuras 13A e 13B) e HCO_3^- (Figuras 13C e 13C) nas duas camadas, quanto mais alcalino o pH do solo, menor será a concentração destes atributos.

Nos mapas de isolinhas da safra de 2013/2014 do K^+ (Figuras 11D e 11E), Na^+ (Figuras 12E e 12F) e RAS (Figuras 12G e 12H) pode ser verificada a mesma distribuição espacial.

Os mapas de variabilidade espacial e temporal dos sais solúveis (CEes, Na^+ , RAS, Cl^- e SO_4^{2-}) em todas as safras obtiveram o mesmo padrão espacial, tal similaridade é devida a presença de maiores valores de umidade do solo nas partes de menor cota do terreno. Os pontos amostrados na cota baixa da área (Figura 2), obtiveram valores superiores de CEes. Provavelmente, porque a área experimental está localizada próxima a zonas influenciadas por elevada salinidade, devido à sua proximidade com o mar, sobretudo nos períodos de maré alta, sendo a salinidade mais acentuada nas partes mais baixas (Richards, 1970; Pizarro, 1978; Dias et al., 2003; Artur et al., 2014; Siqueira et al., 2015). A área está localizada à aproximadamente 10 km do Oceano Atlântico na direção leste e a 2,5 km a nordeste do rio que deságua no oceano, sofrendo influencia salina de duas fontes distintas.

Verificou-se por meio da análise do mapa topográfico da área de estudo (Figura 2), uma vez que no momento das amostragens as partes mais baixas do terreno encontravam-se encharcadas, enquanto nas partes mais altas do terreno o lençol freático encontrava-se mais afastado da superfície. A ocorrência desse fato está relacionada ao excedente hídrico na área de estudo, representado pelo lençol freático que estava muito próximo à superfície do solo no momento das amostragens dos demais atributos do solo em estudo, conseqüentemente, ocorreu devido má drenagem da área (Gheyi et al., 1997; Wanderley, 2009; Dias e Blanco, 2010; Silva et al., 2011; Amaral Júnior et al., 2012; Artur et al., 2014; Siqueira et al., 2015).

A variabilidade espacial e temporal da produtividade de cana-de-açúcar foi influenciada pela CEes, pH, Na^+ , RAS, Cl^- e SO_4^{2-} , com isso, os mapas temáticos favorecerão a tomada de decisão no processo de produção de cana-de-açúcar, bem como definir parâmetros que contribuíssem para uma amostragem otimizada dos atributos físicos e químicos do solo, favorecendo a diminuição dos custos com amostragem (Silva et al., 2013). O relevo foi fator que mais interferiu sobre a variabilidade de todos os atributos estudados.

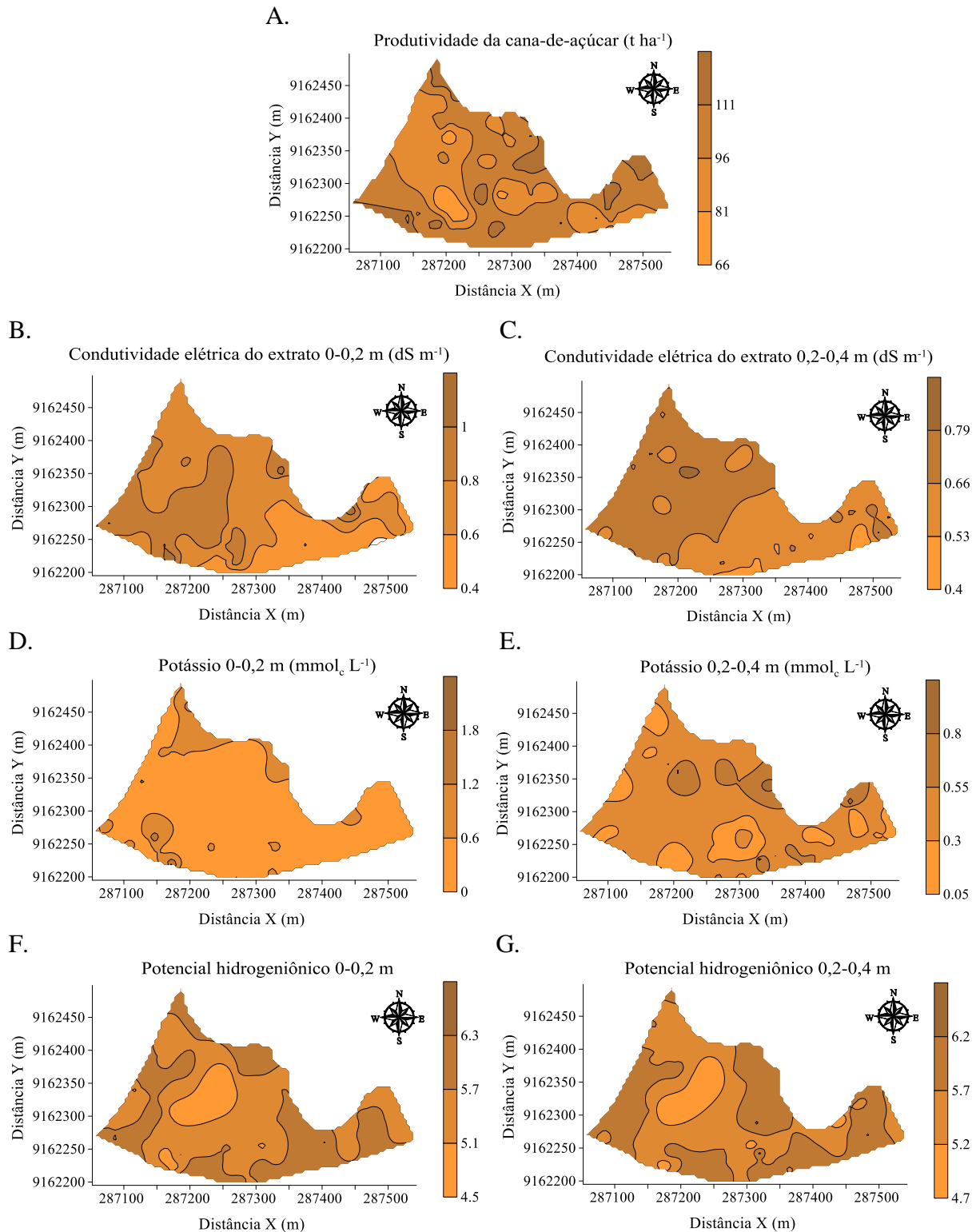


Figura 11. Mapa de isolinhas da safra 2013/2014: (A) Valores da produtividade da cana-de-açúcar; (B) condutividade elétrica do extrato saturação (CEes) na camada de 0-0,20 m e (C) de 0,20-0,40 m do solo; (D) potássio (K^+) na camada de 0-0,20 m e (E) de 0,20-0,40 m do solo; (F) potencial hidrogeniônico (pH) na camada de 0-0,20 m e (G) de 0,20-0,40 m do solo.

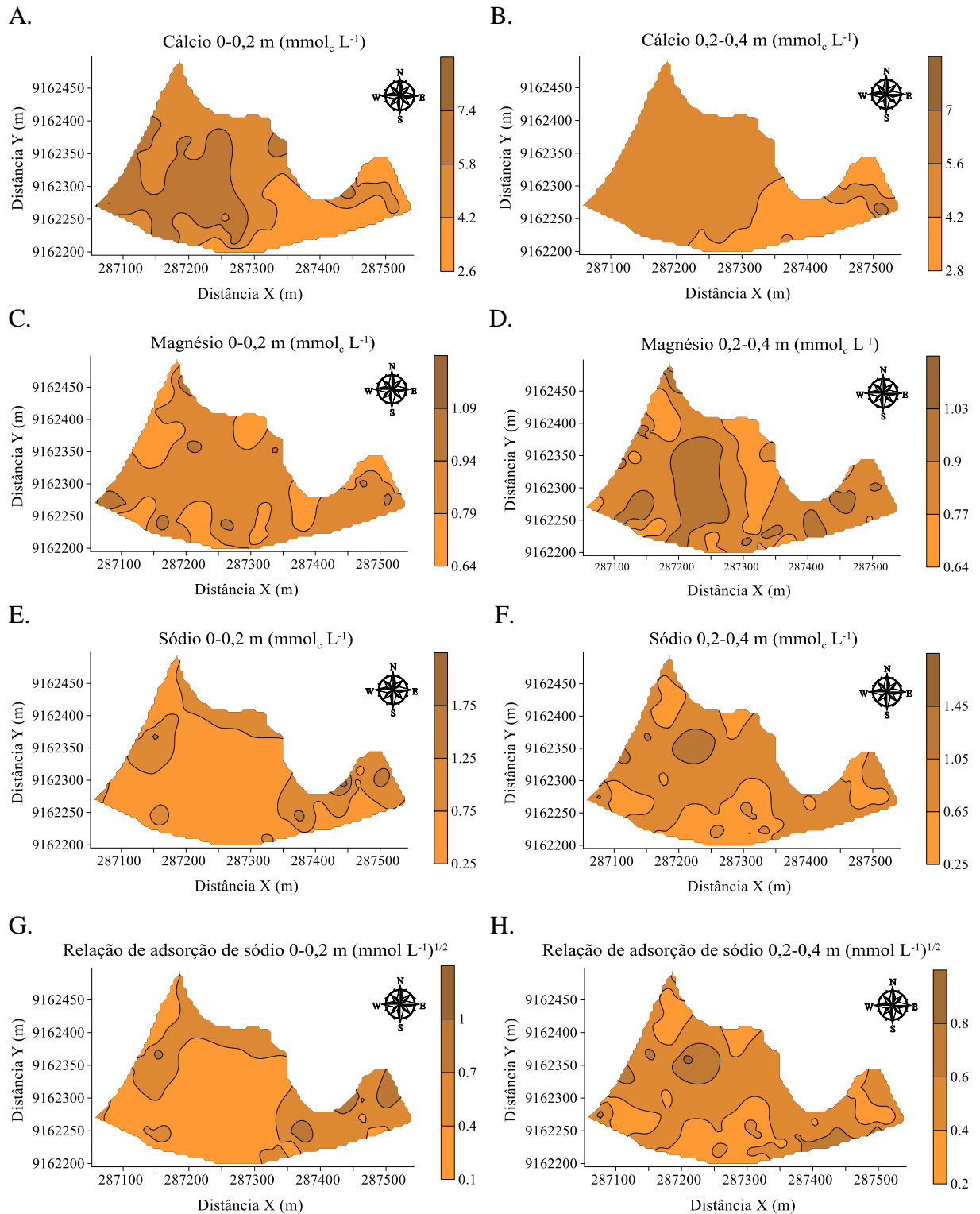


Figura 12. Mapa de isolinhas da safra 2013/2014: (A) Valores de cálcio (Ca^{2+}) na camada de 0-0,20 m e (B) de 0,20-0,40 m do solo; (C) magnésio (Mg^{2+}) na camada de 0-0,20 m e (D) de 0,20-0,40 m do solo; (E) sódio (Na^+) na camada de 0-0,20 m e (F) de 0,20-0,40 m do solo; (G) e relação de adsorção de sódio (RAS) na camada de 0-0,20 m e (H) de 0,20-0,40 m do solo.

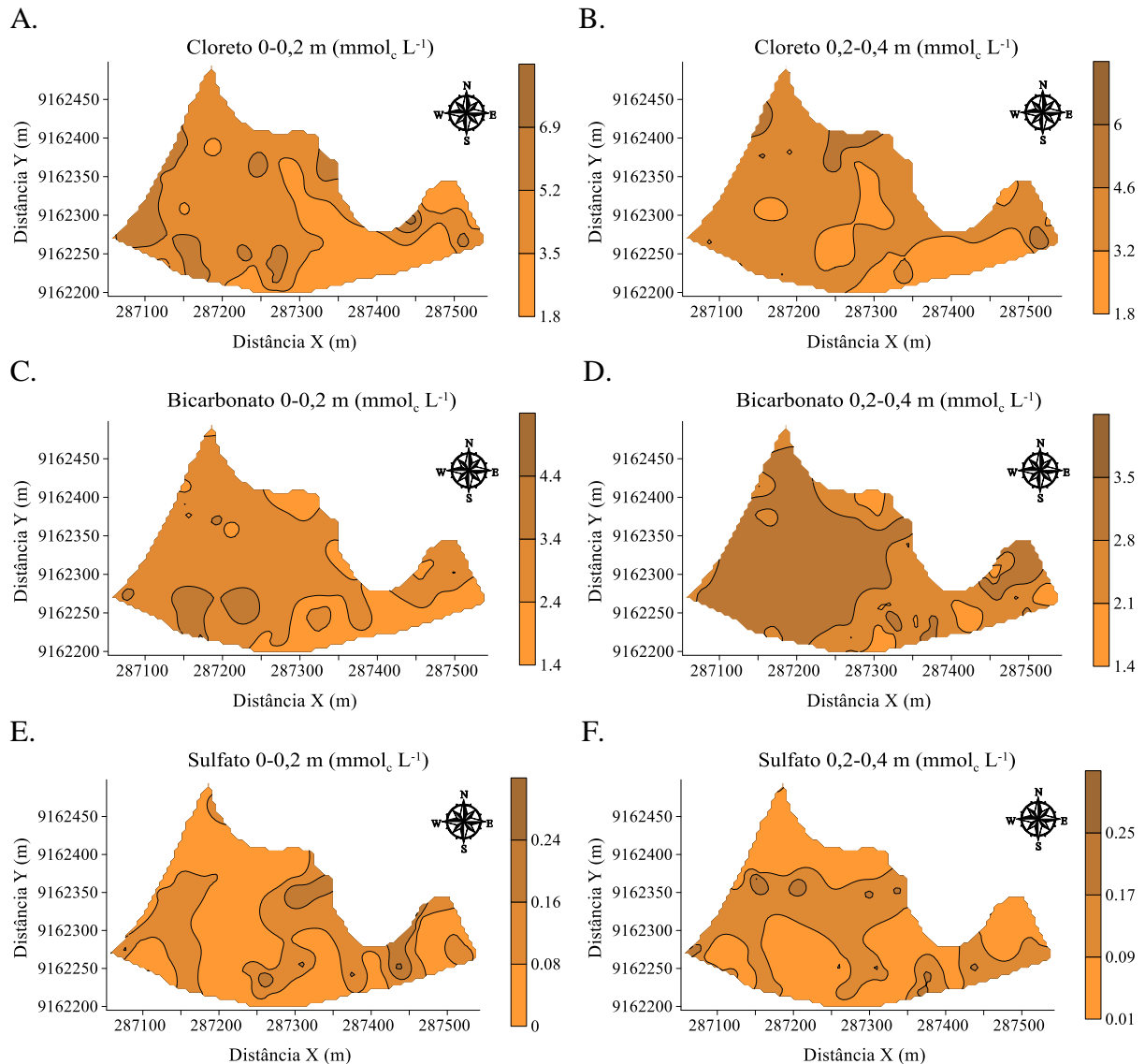


Figura 13. Mapa de isolinhas da safra 2013/2014: (A) Valores de cloreto (Cl^-) na camada de 0-0,20 m e (B) de 0,20-0,40 m do solo; (C) bicarbonato (HCO_3^-) na camada de 0-0,20 m e (D) de 0,20-0,40 m do solo; (E) sulfato (SO_4^{2-}) na camada de 0-0,20 m e (F) de 0,20-0,40 m do solo.

Possivelmente, o índice pluviométrico influenciou na variabilidade espacial e temporal da produtividade de cana-de-açúcar e sais solúveis ao longo das 3 safras. Como comentado anteriormente, a maior produtividade da cana-de-açúcar ocorreu na safra de 2013/2014, devido à alta precipitação (1929,4 mm), conseqüentemente, obteve os mapas com os valores de potencial hidrogeniônico (pH) mais altos, maior concentração de SO_4^{2-} , Ca^{2+} e Mg^{2+} ; apresentou menores concentrações da CEes, Na^+ , Cl^- e RAS no solo (Figuras 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13).

Entretanto, na safra de 2012/2013 ocorreu baixo índice pluviométrico (1438,4 mm), com isso, influenciou na distribuição espacial dos mapas de isolinhas com valores de potencial hidrogeniônico (pH) mais baixos, menor concentração de sulfato (SO_4^{2-}), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}); e maiores concentrações da CEes, Na^+ , Cl^- e RAS no solo, quando comparados aos mapas de isolinhas das safras de 2011/2012 (2663,7 mm) e 2013/2014 (Figuras 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13).

Por meio da variabilidade espacial e temporal, pode-se verificar que a CEes, Na^+ , Cl^- e RAS no solo foram os atributos do solo que mais influenciaram na produtividade de cana-de-açúcar, e considerados para a delimitação de zonas homogêneas para fins de manejo diferenciado na área.

2.6. CONCLUSÕES

- O modelo esférico e gaussiano foram o que mais se ajustaram ao conjunto de dados;
- A CEes, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , RAS e Cl^- apresentaram os maiores valores de alcance de todos os atributos do solo analisados, com dependência espacial moderada e forte, e foram os atributos considerados para a delimitação de zonas homogêneas para fins de manejo sítio específico;
- Os mapas de variabilidade espacial da CEes, Na^+ , RAS, Cl^- e SO_4^{2-} apresentaram homogeneidade com o mapa topográfico e da produtividade da cana-de-açúcar e foram inversamente proporcionais aos mapas temáticos do pH;
- O índice pluviométrico influenciou na variabilidade espacial e temporal da produtividade de cana-de-açúcar e sais solúveis.

2.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amaral Júnior, V. P.; Barreto, H. B. F.; Miranda, N. O.; Medeiros, J. F.; Lima, A. S. Parâmetros da equação de Van Genuchten e índices de solo sob lâminas crescentes de irrigação com água salina. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 8, n. 4, p. 60-65, 2012.

Alves, S. M.; Alcântara, G. R.; Reis, E. F.; Queiroz, D. M.; Valente, D. S. M. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 1, p. 104-114, 2013.

- Artur, A. G.; Oliveira, D. P.; Costa, M. C. G.; Romero, R. E.; Silva, M. V. C.; Ferreira, T. O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 141–149, 2014.
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Traduzido por Gheyi, H. R.; Medeiros, J. F.; Damasceno, F. A. V. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29 revisado). Campina Grande: UFPB/FAO, 1999, 153 p.
- Bohn, H. L.; McNeal, B. L.; O'Connor, G.A. **Soil chemistry**. 2. ed. New York: John Wiley e Sons, 1985. 341 p.
- Bottega, E. L.; Queiroz, D. M.; Santos, N. T.; Pinto, F. A. C.; Souza, C. M. A. Correlação entre condutividade elétrica aparente e atributos químicos e físicos de um Latossolo. **Comunicata Scientiae**, v. 6, n. 2, p. 134-142, 2015.
- Bottega, E. L.; Queiroz, D. M.; Pinto, F. A. C.; Souza, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.
- Brady, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro, 1989, 215p.
- Brasil. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco** (Boletim Técnico, 26, Série Pedologia, 14). Convênio de mapeamento de solos MA/DNPEA-SUDENE/DRN convênio MA/ CONTAP/USAID/ETA. Recife, 1972.
- Brasil. Ministério da Agricultura. Escritório de Pesquisas e Experimentação. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. **Levantamento detalhado dos solos da Estação Experimental de Itapirema** (Boletim Técnico, 12). Rio de Janeiro, 1969. 84 p.
- Cambardella, C. A.; Moorman, T. B; Novack, J. M; Parkin, T. B; Karlen, D. L; Turco R. F.; Knopka, A. E. Field-scale variability of soil proprieties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, v. 58, p. 1240-1248, 1994.
- Carvalho, M. P.; Takeda, E. Y.; Freddi, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 695-703, 2003.

Cerri, D. G. P.; Magalhães, P. S. G. Correlation of physical and chemical attributes of soil with sugarcane yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 613-620, 2012.

CONAB - Companhia Brasileira de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar, safra 2014/2015**. Quarto Levantamento, v. 1, n. 4, p. 1-29, Brasília, 2015. Disponível em: <
http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_13_08_45_51_boletim_cana_portugues_-_4o_lev_-_14-15.pdf>. Consultado em 5 de ago. 2015

Costa Netto, M. L. **Avaliação da salinidade do solo utilizando sensor de indução eletromagnética e geoestatística em vale aluvial no agreste de Pernambuco**. 2008. 93 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2008.

Dantas, J.; No., Figueiredo, J. L. C., Farias, C. H. A., Azevedo, H. M., Azevedo, C. A. V. (2006). Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n.2, p. 283–288, 2006.

Dias, M. J.; Alves, S. M. F.; Reis, E. F.; Oliveira, D. G. Probabilidade de ocorrência dos atributos químicos em um Latossolo sob plantio direto. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 4, p. 181-189, 2015.

Dias, N. S.; Blanco, F. F. **Efeitos dos sais no solo e na planta**. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCT Sal, 2010, 472 p.

Dias, N. S.; Gheyi, H. R.; Duarte, S. N. **Prevenção, manejo e recuperação dos solos afetados por sais**. Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP. Série Didática n. 13, Piracicaba, 2003, 118 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2013, 353 p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2011, 212 p.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 2009, 627 p.

- Freire, M. B. G. S.; Ruiz, H. A.; Ribeiro, M. R.; Ferreira, P. A.; Alvarez, V. H.; Freire, F. J. Estimativa do risco de sodificação de solos de Pernambuco pelo uso de águas salinas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 227-232, 2003.
- Gheller, A. C. A. **Manual de método alternativo para medição da produção de cana-de-açúcar**. Araras: UFSCar, CCA, DBV, 1999, 7 p.
- Gheyi, H. R., Queiroz, J. E., Medeiros, J. F. **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada**. Campina Grande: UFPB, 1997, 383 p.
- Golden Software. **Surfer 11.0 - user's guide**. New York: Golden Software, 2002.
- Hasegawa, P. M.; Bressan, R. A.; Zhu, J. K.; Bohnert, H. J. et al. Plant cellular and molecular responses to high salinity. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 51, p. 463-499, 2000.
- Lima, V. L. A. **Efeitos da qualidade da água de irrigação e da fração de lixiviação sobre a cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em condições de milímetro de drenagem**. 1998. 87 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.
- Machado, L. O.; Lana, A. M. Q.; Lana, R. M. Q.; Guimarães, E. C.; Ferreira, C. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 591-599, 2007.
- Montenegro, A. A. A.; Montenegro, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade, e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 30-37, 2006.
- Oliveira, L. B. T. D.; Santos, A. C.; Lima, J. S.; Neves Neto, D. N. Variabilidade espacial das respostas produtivas e morfológicas do capim-Marandu. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 16, n.4, p. 772-783, 2015.
- Pereira, S. R. Solos afetados por sais. In: Cavalcanti, F.V. A. (Coord.). **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco**. 2 ed. Recife: IPA, p.76-82, 1998.
- Pizarro, F. **Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos**. Madrid: Agrícola Espanhola, 1978, 525 p.

- Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez V. V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.
- Richards, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: U. S. Government Printing, Office, D. C. Department of Agriculture. Handbook 60. 1954, 160 p.
- Robertson, G.P. **GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998, 152 p.
- Santos, E. O. J; Gontijo, I.; Silva, M. B.; Drumond Neto, A. P. Variabilidade espacial de macronutrientes em uma lavoura de café conilon no Norte do Espírito Santo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 469-476, 2015.
- Santos, E. O. J; Gontijo, I.; Silva, M. B. Planejamento amostral de propriedades químicas do solo em lavoura de café conilon. **Coffee Science**, v. 8, n. 4, p. 423-431, 2013.
- Silva, A. R.; Guimarães, E. C.; Tavares, M. Efeito de tendência no ajuste de semivariogramas esféricos. **FAMAT em revista**, n. 10, p. 107-116, 2008.
- Silva, J. L. A.; Alves, S. S. V.; Nascimento, I. B.; Silva, M. V. T.; Medeiros, J. F. Evolução da salinidade em solos representativos do Agropólo Mossoró-Assu cultivado com meloeiro com água de diferentes salinidades. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 7, n. 4, p. 26-31, 2011.
- Silva, M. V. T.; Lima, R. M. S.; Oliveira, F. L.; Chaves, S. W. P.; Medeiros, J. F.; CE e RAS do extrato de saturação do solo sob diferentes níveis de salinidade e doses de nitrogênio no cultivo da abóbora. **Revista Verde de Agrometeorologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 2, p. 277-284, 2014.
- Silva, J. S.; Montenegro, A. A. A.; Silva, E. F. F.; Andrade, C. W. L.; Silva, J. R. L. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 6, n. 4, p. 764-776, 2013.
- Siqueira, G. M.; Dafonte, J.; Paz González, A. Estimación de la textura y contenido de agua en el suelo a partir de datos de conductividad eléctrica utilizando geoestadística multivariante. **Estudios de la Zona No Saturada del Suelo**, v. 9, p. 228-23, 2009.

- Siqueira, G. M.; Silva, E.F.F.; Dafonte, J. D. Distribuição espacial da condutividade elétrica do solo medida por indução eletromagnética e da produtividade de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p.215-223, 2015.
- Souza, E. R.; Montenegro, A. A. A.; Montenegro, S. M. G. L.; Santos, T. E. M.; Andrade, T. S.; Pedrosa, E. R. Variabilidade espacial das frações granulométricas e da salinidade em um Neossolo Flúvico do semiárido. **Revista Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 698-704, 2008.
- Souza, E. R., Montenegro, A. A. A.; Santos, F. X.; Costa Neto, M. L. Dinâmica da condutividade elétrica em Neossolo Flúvico no semiárido. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. v. 7, n. 2, p.124-131, 2007.
- Souza, Z. M.; Cerri, D. G. P.; Colet, M. J.; Rodrigues, L. H. A.; Magalhães, P. S. G.; Mandoni, R. J. A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 4, p. 840-847, 2010.
- Taiz, L.; Zeiger, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013, 918 p.
- Vieira, S.R. **Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo**: In Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Schaefer, C.E.G.R. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p. 1-55, 2000.
- Vieira, S. R.; Hatfield, J. L.; Nielsen, D. R.; Biggar, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v. 51, n.3, p. 1-75, 1983.
- Vieira, S. R.; Nielsen, D. R.; Biggar, J. W.; Tillotson, P. M. The Scaling of semivariograms and the kriging estimation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 525-533, 1997.
- Wanderley, R. A. **Salinização de solos sob aplicação de rejeito de dessalinizadores com e sem adição de fertilizantes**. 2009. 52 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009.
- Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (ed.). Application of soil physics, New York: **Academic Press**, p. 319-324, 1980.

3. CAPITULO III

VARIABILIDADE ESPACIAL DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO E SUA CORRELAÇÃO COM OS ATRIBUTOS DE SOLO

VARIABILIDADE ESPACIAL DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO E SUA CORRELAÇÃO COM OS ATRIBUTOS DE SOLO

3.1. RESUMO

A condutividade elétrica aparente do solo medida pela técnica da indução eletromagnética com EM38 está relacionada com a salinidade, a percentagem de saturação, o conteúdo de água, a densidade do solo, a textura e a matéria orgânica dos solos, e tem sido amplamente utilizada devido a sua correlação com atributos do solo, e, por conseguinte, com a produtividade dos cultivos, cada vez mais utilizada para o manejo sítio-específico. Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi caracterizar a distribuição espacial entre a condutividade elétrica aparente do solo medida por indução eletromagnética, condutividade elétrica do extrato de saturação, umidade e textura. O experimento foi realizado em uma área cultivada com cana-de-açúcar, localizada na Usina Santa Teresa no Município de Goiana, Zona da Mata-Norte do Estado de Pernambuco, Brasil. O lote estudado possui área de 6,5 ha, com coordenadas geográficas 07° 33' 39" S e 35° 00' 10" W e altitude média de 8,5 m. As amostragens do solo foram realizadas em 90 pontos em uma malha irregular na área experimental. Foram coletadas amostras deformadas nas camadas de solo entre as profundidades de 0-0,2 m e 0,20-0,4 m, com a finalidade de analisar condutividade elétrica do extrato de saturação e textura do solo. Para determinação da umidade foi utilizada uma sonda TDR e para a condutividade elétrica aparente do solo foi utilizado o equipamento EM38. Os dados foram submetidos à estatística descritiva e análise de normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. A análise da dependência espacial foi realizada por meio da geoestatística. Para a construção dos mapas foi utilizado o programa SURFER 11. Foi calculada a matriz de coeficientes de correlação linear de Pearson (r) a 5%, para todas as variáveis, utilizando o programa Statistica. A análise geoestatística demonstrou que o modelo esférico foi o que melhor se ajustou para os semivariogramas dos dados; A condutividade elétrica medida por indução eletromagnética demonstrou-se como uma importante ferramenta para predição dos atributos do solo. Os mapas de distribuição espacial e a correlação linear da condutividade elétrica aparente e do extrato de saturação, e umidade do solo apresentaram mesmo padrão espacial com o mapa topográfico; Não houve dependência espacial para a areia e silte, demonstrando que o esquema de amostragem não foi suficiente para detectar a distribuição espacial da textura.

Palavras Chave: agricultura de precisão, geoestatística, manejo de sais, textura, umidade.

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND ITS CORRELATION TO SOIL ATTRIBUTES

3.2. ABSTRACT

Soil apparent electrical conductivity measured by the electromagnetic induction with EM38 is related to soil salinity, saturation percentage, water content, bulk density, texture and organic matter content, and it has been widely used due to its correlation with soil attributes and, consequently, with crop yields, and it widely used for site-specific management. Therefore, it was aimed to characterize spatial distribution of Soil apparent electrical conductivity measured by electromagnetic induction, saturation extract electrical conductivity, water content and soil texture. The experiment was carried out in an area under sugarcane cultivation located at Usina Santa Teresa in Goiana, Zona da Mata-Norte of Pernambuco State, Brazil. The plot in study has 6.5 ha, under the following coordinates: 07° 33' 39'' S e 35° 00' 10'' W, and average altitude of 8.5 m. Soil sampling and crop yield measurements were performed on a 90-point regular grid in the experimental site. Disturbed soil was sampled from layers between the depths of 0-0.20 m and 0.20-0.40 m, in order to analyze saturation extract electrical conductivity and soil texture. Soil moisture content was determined using a TDR probe and soil apparent conductivity it was used an EM38 device. Data were subjected to descriptive analyses and tested for normality using the Kolmogorov-Smirnov test. Spatial dependence analysis was performed using geostatistics. In order to create maps we used SURFER 11 software. Linear Pearson's coefficient of correlation (r) at 5% of probability for all variables; we used Statistica software. Geostatistical analysis showed that spherical model fitted best for the data semivariograms. Electrical conductivity measured by electromagnetic conductivity has showed as a great tool for soil attributes prediction. Spatial distribution maps and linear correlation of apparent and saturation extract electrical conductivities and soil water content showed the same spatial pattern when compared to the topography map. There was no spatial dependence for sand and silt, demonstrating that the sampling layout was not sufficient to detect spatial distribution for soil texture.

Key words: precision agriculture, geostatistics, salt management, soil texture, water content.

3.3. INTRODUÇÃO

A agricultura enfrenta o desafio de aumentar a produção de alimentos, em resposta ao acelerado crescimento populacional mundial. Tecnologias ligadas ao sensoriamento remoto, aos sistemas de informações geográficas e ao sistema de posicionamento por satélite (GPS) vêm propiciando o desenvolvimento da agricultura de precisão, que permite o manejo sítio-específico das práticas agrícolas, com maior eficiência de aplicação de insumos, diminuição dos custos de produção e aumento de produtividade.

A crescente intensificação da produção agropecuária levou a agricultura convencional a tratar o campo de maneira uniforme, com base em valores médios, ignorando as variações espaciais e temporais dos diversos fatores envolvidos no processo de produção agrícola, tais como: o teor de nutrientes, o teor de matéria orgânica, a umidade, a variabilidade do solo e do clima, etc. O embasamento da agricultura de precisão está na análise dessas variações espaciais e temporais dos fatores de produção, especialmente do solo. A partir dessa análise, o agricultor define como aplicar, no local correto, no momento adequado, as quantidades de insumos necessários à produção agrícola (Silva et al., 2013).

A agricultura de precisão permite, pelo uso de delimitação por coordenadas georreferenciadas, um planejamento mais racional do manejo de nutrientes, controle de pragas, umidade do solo, controle de plantas daninhas, além de seleção de cultivares em função de sua adaptabilidade às diferentes condições identificadas nas áreas cultivadas (Silva et al., 2013).

Atualmente os países mais desenvolvidos vêm utilizando a condutividade elétrica como um indicador no monitoramento de características do solo e uma das mais frequentes medições utilizadas para caracterizar variabilidade do campo para aplicação em agricultura de precisão (Corwin e Lesch, 2003). Os mapas de condutividade elétrica do solo são um método utilizado para determinar zonas de manejo dentro de um campo, devido ao baixo custo e agilidade de medição (Shaner et al., 2008).

A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) medida pela técnica da indução eletromagnética com EM38, tem sido amplamente utilizada devido a sua correlação com atributos do solo (salinidade, a percentagem de saturação, o conteúdo de água, a densidade do solo, a porosidade, a textura e a matéria orgânica), e, por conseguinte, com a produtividade dos cultivos. Tem sido cada vez mais utilizada para o manejo sítio-específico (Lesch et al., 2005; Brevik, 2012; Siqueira et al., 2015a).

Corwin e Lesch (2005a) destacam o potencial da utilização da condutividade elétrica aparente, medida com o EM38, na agricultura de precisão, enfatizando sua representatividade

em aplicações voltadas para estudos da variabilidade espacial da salinidade de sais. Triantafyllidis et al. (2009) destacam que as medições eletromagnéticas têm sido muito utilizadas em solos sujeitos ao acúmulo de sais, porque essas estão fortemente correlacionadas com a salinidade do solo.

Para a avaliação da condutividade elétrica aparente do solo, a indução eletromagnética surge como importante alternativa, haja vista tratar-se de uma técnica não invasiva, que pode ser utilizada para avaliar o perfil de condutividade elétrica aparente do solo, por meio de leituras múltiplas, obtidas com o instrumento disposto a diferentes alturas acima da superfície do solo. Segundo McNeill (1980) e Geonics (1999), as estimativas de condutividade elétrica podem ser realizadas com rapidez e praticidade e sem promover o revolvimento do solo para a retirada de amostras.

Mais importante ainda, ao contrário da estratégia de amostragem tradicional, que só pode produzir informações da salinidade de um ponto específico de amostragem, o equipamento EM38 pode obter informações da condutividade elétrica aparente do solo para uma série de pontos de amostragem relativamente rápida e fácil. Isto torna a medida mais representativa do que a informação obtida a partir de um único ponto.

Portanto, o objetivo do trabalho foi caracterizar a distribuição espacial entre a condutividade elétrica aparente do solo medida por indução eletromagnética, condutividade elétrica do extrato de saturação, umidade e textura do solo sob cultivo de cana-de-açúcar.

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1. Caracterização da área experimental

O experimento foi realizado em área da Usina Santa Teresa no Município de Goiana, na Zona da Mata Norte, Estado de Pernambuco, e cujas dimensões correspondem a aproximadamente 6,5 ha, e está situada sob as seguintes coordenadas geográficas: 07° 34' 25'' S e 34° 55' 39'' W (Figura 1) e altitude média de 8,5 m (Figura 2).

Os solos da região da área de estudo derivam do grupo Barreiras, constituídos de sedimentos de origem continental do final do Terciário, de textura arenosa até argilosa, caracterizados por uma alteração intensa (Brasil, 1972). Da área experimental o solo é um Espodosolo Humilúvico órtico textura arenosa de acordo com a classificação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013), cuja caracterização física para área de estudo é

apresentada na Tabela 1. A textura do solo (argila, silte e areia) foi determinada pelo método do densímetro, conforme descrito pela EMBRAPA (2011).

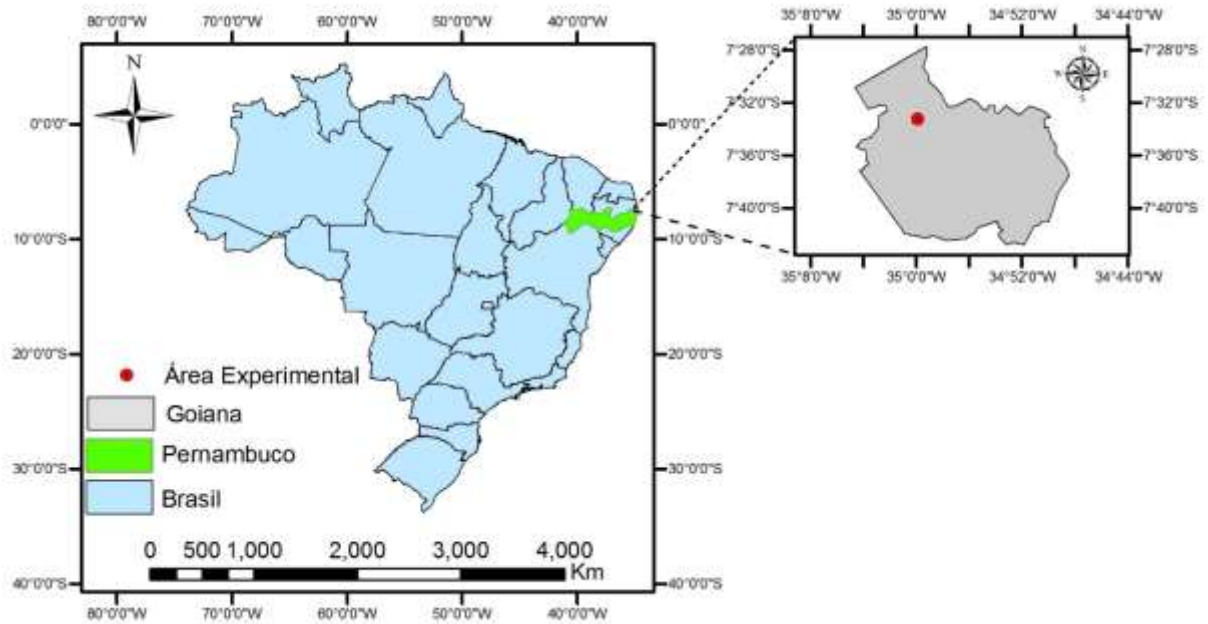


Figura 1. Mapa do Brasil com a localização do Estado de Pernambuco e em destaque, o Município de Goiana – PE, com a área experimental.

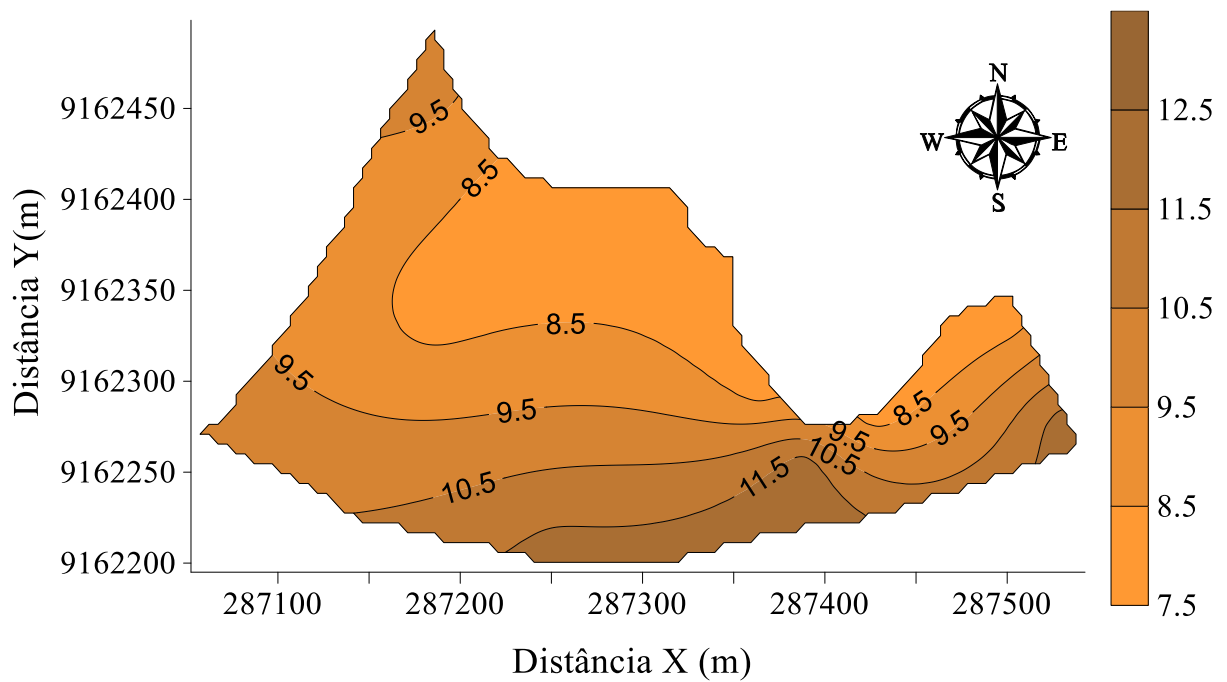


Figura 2. Mapa topográfico para área de estudo.

Tabela 1. Granulometria para o Espodossolo Humilúvico órtico presente na área de estudo.

Camada (m)	Análise granulométrica (g kg ⁻¹)		
	Argila	Silte	Areia
0,0-0,2	253,20	33,91	712,89
0,2-0,4	253,38	26,87	719,76

O clima da região, segundo a Classificação Climática de Köppen, é tropical úmido do tipo As' ou pseudotropical, que se caracteriza por ser quente e úmido, com chuvas de outono a inverno de aproximadamente 1924 mm anualmente, com temperaturas médias anuais variando em torno de 24°C.

A área em estudo vem sendo manejada nos últimos 27 anos com monocultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), cultivada em sequeiro, com queima da palha para colheita. Na safra de 2010/2011, o cultivo foi renovado, sendo a área arada, gradeada, sulcada, foi realizada a calagem, adubação e posteriormente cultivada novamente com cana-de-açúcar, variedade RB867515.

3.4.2. Amostragens

No dia 21/01/2014, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4 m de profundidade para analisar a textura e condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), e foram medidos à condutividade elétrica aparente e umidade do solo em 90 pontos de amostragem georreferenciados com GPS etrex-GARMIN, em uma malha irregular (Figura 3).

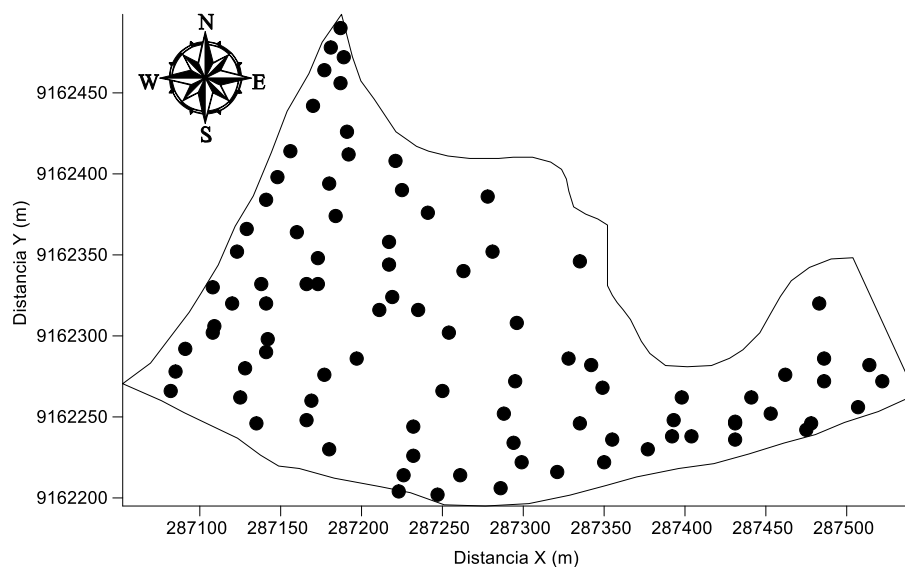


Figura 3. Localização dos pontos de amostragem na área de estudo.

3.4.2.1. Umidade volumétrica do solo

A umidade volumétrica do solo (θ) na camada de 0-0,2 e 0,2-0,4 m de profundidade foi determinada por meio de uma Sonda TDR portátil modelo CD620, com o princípio de funcionamento de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) - Hydrosense® Campbell Scientific Austrália Pty. Ltd.).

3.4.2.2. Condutividade elétrica aparente do solo

Nos 90 pontos foram medidos a condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m^{-1}) com um dispositivo de indução eletromagnética EM38-DD (Geonics, 1999). O equipamento possibilita duas medidas, na posição horizontal (CEa-H) para fornecer medida efetiva de aproximadamente 1,5 m de profundidade e outra na posição vertical (CEa-V) com uma profundidade de medição efetiva de aproximadamente 0,75 m.

3.4.3. Análises laboratoriais

As amostras de solos foram colocadas para secar ao ar, posteriormente, destorroada, passadas na peneira de 2 mm (TFSA) e analisados os seguintes atributos:

As frações granulométricas de areia, silte e argila, foram determinadas pelo método do densímetro de Boyoucos utilizando-se um agitador mecânico como dispersante físico, 5 min para solos com textura arenosa, utilizando-se de 25 mL de hexametáfosfato de sódio (Calgon) como dispersante químico, de acordo com a metodologia proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2011).

A condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) foi analisada conforme a metodologia proposta pela EMBRAPA (2011), de acordo a descrição a seguir: foi determinada pelo método eletrométrico (condutivímetro). O procedimento descrito é o do extrato obtido na pasta de saturação (Richards, 1954).

3.4.4. Análises estatísticas e geoestatísticas

A estatística descritiva foi aplicada determinando-se a média, a mediana, o desvio padrão, os valores máximos e mínimos, os coeficientes de assimetria e curtose e o coeficiente de variação, para obter informações sobre a dispersão e a distribuição das variáveis, a análise de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov Smirnov (KS) ao nível de 5%

de probabilidade, para ambas as análises foi utilizado o programa Surfer 11.0 (Golden Software, 2002).

Foi calculada a matriz de coeficientes de correlação linear de Pearson (r) a 5% e feita classificação da correlação, onde $r=1$ (perfeita positiva); $0,8 < r < 1$ (forte positiva); $0,5 < r < 0,8$ (moderada positiva); $0,1 < r < 0,5$ (fraca positiva); $0 < r < 0,1$ (íntima positiva); 0 (nula); $-0,1 < r < 0$ (íntima negativa); $-0,5 < r < -0,1$ (fraca negativa); $-0,8 < r < -0,5$ (moderada negativa); $-1 < r < -0,8$ (forte negativa); $r = -1$ (perfeita negativa); para todas as variáveis analisadas pelo o software Statistica (Statsoft, 2004).

A variabilidade das variáveis foi classificada por meio dos valores de coeficiente de variação (CV), segundo Warrick e Nielsen (1980), como baixa ($CV < 12\%$), média ($12 > CV < 62\%$) e alta ($CV > 62\%$).

A análise da dependência espacial foi feita por meio da geoestatística (Vieira 2000, Robertson, 1998) e do ajuste de semivariogramas, com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a autocorrelação espacial entre locais vizinhos foi calculada através da semivariância $\gamma(h)$ a qual é estimada pela Equação (1):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (1)$$

em que, $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ separados por uma distância h . O semivariograma é representado pelo gráfico (h) versus h .

Para construção e ajuste dos semivariogramas foi utilizado o programa GS⁺. Os critérios e procedimentos para ajuste do modelo do semivariograma foram feitos conforme Vieira et al. (1983).

Foram ajustados modelos matemáticos e definidos os parâmetros para os semivariogramas: a) efeito pepita (C_0), que é o valor de γ quando $h=0$; b) alcance da dependência espacial (a), que é a distância em que $\gamma(h)$ permanece aproximadamente constante, após aumentar com o aumento de h ; c) patamar (C_0+C_1) que é o valor de $\gamma(h)$ a partir do alcance e que se aproxima da variância dos dados, se ela existir.

Após a obtenção dos semivariogramas, foram testados os modelos gaussiano, esférico e exponencial descritos pelas Equações (2), (3) e (4), respectivamente:

Modelo Esférico:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C_1 \left[1.5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 < h \leq a \\ \gamma(h) &= C_0 + C_1 & h > a \end{aligned} \quad (2)$$

Modelo Gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp^{-\left(\frac{h^2}{a^2}\right)} \right] \quad h \neq 0 \quad (3)$$

Modelo Exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp^{-\left(\frac{h}{a}\right)} \right] \quad h \neq 0 \quad (4)$$

Os dados que apresentaram tendência nos semivariogramas e mapas, foram retirados a tendência por meio das seguintes Equações (5, 6 e 7) para estimação dos resíduos:

1. Linear

$$m(x) = A_0 + A_1\chi + A_2\gamma + A_3\chi\gamma \quad (5)$$

2. Quadrática ou parabólica

$$m(x) = A_0 + A_1\chi + A_2\gamma + A_3\chi^2 + A_4\gamma^2 + A_5\chi\gamma \quad (6)$$

3. Cúbica

$$m(x) = A_0 + A_1\chi + A_2\gamma + A_3\chi^2 + A_4\gamma^2 + A_5\chi\gamma + A_6\chi^3 + A_7\gamma^3 + A_8\chi^2\gamma + A_9\chi\gamma^2 \quad (7)$$

O grau de dependência espacial (GDE) foi analisado segundo Cambardella et al. (1994), em que se preconiza a proporção em porcentagem do efeito pepita (C_0) em relação ao patamar (C_0+C_1), apresentando: (a) dependência forte < 25%; (b) dependência moderada entre 25 e 75% e (c) dependência fraca > 75%, calculado pela Equação (8):

$$GDE = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \times 100 \quad (8)$$

Para a construção dos mapas espaciais e visualização da distribuição espacial foi utilizado o programa Surfer 11.0 (Golden Software, 2002). Para efeito de comparação entre os atributos em estudo, quando detectada a presença de efeito pepita puro, foram construídos mapas de isolinhas usando os parâmetros de “default” do programa Surfer, que se baseia em um modelo de interpolação linear por krigagem.

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de média e mediana determinados foram relativamente próximos para condutividade elétrica aparente do solo medida na posição vertical (CEa-V), condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), umidade (U) e da granulometria do solo (argila e areia), pela estatística descritiva apresentar valores de tendência central (média) e mediana distintas, que tenderam à distribuição normal de probabilidade. Com exceção da condutividade elétrica aparente do solo medida na posição horizontal (CEa-H) e silte, que caracterizaram-se por ter uma grande quantidade de valores baixos, e alguns valores altos proporcionando a diferença entre a média e a mediana (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros da estatística descritiva dos valores da condutividade elétrica do extrato aparente do solo (CEa), condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), umidade (U) e da textura do solo.

Parâmetros		Média	Mediana	Variância	DP	CV (%)	Assimetria	Curtose	D
CEa (mS m ⁻¹)	V	4,20	4,00	8,94	2,99	71,24	0,79	-0,05	0,10 n
	H	1,73	0,50	5,95	2,44	140,90	1,53	1,67	0,25 n
CEes (dS m ⁻¹)	0-0,2 m	0,70	0,68	0,03	0,19	26,36	0,53	-0,45	0,16 n
	0,2-0,4m	0,64	0,65	0,01	0,08	12,82	-0,31	-0,11	0,08 n
U (θ)	0-0,2 m	7,16	6,50	17,20	4,15	57,92	1,98	3,93	0,23 Ln
	0,2-0,4m	9,63	8,90	29,67	5,45	56,54	1,57	3,24	0,16 Ln
Argila (g kg ⁻¹)	0-0,2 m	253,20	256,00	786,85	28,05	11,08	-0,48	0,54	0,14 n
	0,2-0,4m	253,38	256,00	447,77	21,16	8,35	0,15	0,42	0,12 n
Silte (g kg ⁻¹)	0-0,2 m	33,91	27,20	1030,61	32,10	94,68	0,94	-0,10	0,20 n
	0,2-0,4m	26,87	20,00	582,05	24,13	89,80	1,05	1,01	0,16 n
Areia (g kg ⁻¹)	0-0,2 m	712,89	716,80	1399,26	37,41	5,25	-0,24	-0,20	0,13 n
	0,2-0,4m	719,76	724,00	989,82	31,46	4,37	-0,52	0,33	0,11 n

*CV=Coefficiente de Variação; DP- Desvio Padrão; D= probabilidade de erro de 1% pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, n = normal, Ln = lognormal.

Os valores médios para a CEa-V e CEa-H foram distintos, tal fato pode ser explicado porque a CEa-H fornece medida efetiva de aproximadamente 1,5 m de profundidade e outra na posição vertical (CEa-V) com uma profundidade de medição efetiva de aproximadamente 0,75 m. No presente trabalho, o fator determinante foi a umidade do solo, pois a mesma influencia os valores de CEa no perfil do solo quando se utiliza o EM38. Corwin e Lesch (2005b) afirmam que se a umidade do solo diminui com a profundidade, então $CEa-H > CEa-V$; Se a umidade aumenta com a profundidade, então $CEa-H < CEa-V$, corroborando com os resultados apresentados na Tabela 2.

Os resultados diferiram dos resultados encontrados por Siqueira et al. (2015a) em amostragens no ano de 2011, na mesma malha e área de estudo, os valores médios para a CEa-V e CEa-H foram relativamente próximos, 15,67 e 13,90, respectivamente. Neste caso, segundo Corwin e Lesch (2005b) quando a umidade é uniforme em todo perfil do solo, a $CEa-H \approx CEa-V$.

A curtose e assimetria tenderam à zero (0) para textura do solo (argila e areia) e, silte na camada de 0-0-2m, CEa-V e CEes, mostrando um comportamento simétrico.

Todos os atributos em estudos apresentaram distribuição de frequência normal (n), por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) com probabilidade de erro de 5%. Com exceção da U que demonstrou possuir distribuição de frequência do tipo lognormal (Ln), conforme demonstrado pelos valores do coeficiente de assimetria, do coeficiente de curtose e do teste de Kolmogorov- Smirnov.

Os resultados para U foram semelhantes ao encontrados por Siqueira et al. (2015b), em um transecto contendo 128 pontos de amostragem com espaçamento de 3 m, na mesma área de estudo, no ano de 2013, onde a mesma apresentou distribuição de frequência do tipo lognormal (Ln). E corroboraram com os resultados encontrados por Siqueira et al. (2015a) que verificaram normalidade dos dados de CEa-V, CEa-H, argila, silte e areia, com estudo na mesma área e malha no ano de 2011.

Os valores de coeficiente de variação (CV) da granulometria do solo (argila e areia) de acordo com Warrick e Nielsen (1980) foram classificados como baixa variação ($CV < 12\%$), revelando assim a baixa heterogeneidade desse atributo na área (Tabela 2). Visto que, a textura é uma propriedade estática de solos, com baixa variação no tempo e espaço (Corwin e Lesch, 2005b). Os resultados corroboram com os encontrados por Siqueira et al. (2015a) que obtiveram valores baixos de CV para todos os atributos granulométricos (areia e argila).

Segundo Warrick e Nielsen (1980) os valores de CV dos dados de U e CEes do solo (Tabela 2), foram classificados como medianos ($12\% < CV < 62\%$). Ao contrário da textura, a U e CEes é uma propriedade dinâmica do solo, que varia com a profundidade e toda a paisagem, geralmente apresenta variabilidade de moderada a alta (Corwin e Lesch, 2005b).

Siqueira et al. (2015b) na mesma área de estudo em 2013, apresentaram valores de CV dos dados de umidade elevados ($CV > 62\%$), 106, 98 e 97%, para as camadas de 0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m de solo, respectivamente. Os resultados encontrados com a CEes diferiram da pesquisa realizada por Silva et al. (2013) com a CEes do solo, que apresentaram alta variação dos dados ($CV=67,0$).

Entretanto, os valores de CV da CEa e o silte (Tabela 2) apresentaram alta variação dos dados ($CV > 62\%$). Pode ser explicado porque a CEa é uma propriedade dinâmica, que varia temporalmente e espacialmente com a profundidade e toda a paisagem e apresenta alta variação no campo. Conseqüentemente, as variações de umidade por meio do lençol freático influenciaram os valores de CEa ao longo do perfil do solo e paisagem (Corwin et al., 2003; Corwin e Lesch, 2003; Corwin e Lesch, 2005b).

Pode-se observar a variabilidade espacial dos atributos por meio da análise do mapa topográfico da área de estudo (Figura 2), visto que, no momento das amostragens as partes de menor cota do terreno encontravam-se mais úmidas, enquanto nas partes mais altas do terreno menos úmidas, em consequência de que o lençol freático se encontrava mais afastado da superfície, justificando as diferenças nas leituras da CEa.

Os resultados diferiram da pesquisa realizada por Siqueira et al. (2015a) que obtiveram valores de CV medianos ($12\% < CV < 62\%$) para a CEa-V (31,10%) e a CEa-H (40,60%), em decorrência de que no momento das amostragens as partes mais baixas do terreno encontravam-se encharcadas, resultante dos valores de umidade mais uniforme em todo perfil do solo nesta baixada da área.

A análise geoestatística (Tabela 3), o modelo exponencial foi o que melhor se ajustou para os semivariogramas dos dados da argila e da U na camada de 0,2-0,4 m. Em pesquisa realizada na mesma área em 2011 por Siqueira et al. (2015a), o modelo exponencial foi o que melhor se ajustou para o semivariograma da argila na camada de 0,2-0,4m.

O modelo esférico foi ajustado para os semivariogramas de CEa nas duas posições e U na camada de 0-0,2 m do solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Siqueira et al. (2009), estudando a variabilidade espacial da condutividade elétrica do solo, em área com gradiente topográfico, ajustaram o modelo esférico para a CEa na camada superficial e em

profundidade. Porém os resultados, diferiram dos ajustes dos semivariogramas da CEa encontrados em pesquisa por Siqueira et al. (2015a) que foram do modelo gaussiano.

Os semivariogramas da CEes na camada de 0,2-0,4 m ajustou-se ao modelo gaussiano. A presença do modelo gaussiano para o dado em questão pode estar associada à presença de relevo côncavo na área de estudo (Siqueira et al., 2015a). O modelo esférico foi ajustado para os semivariogramas de dados de CEes na camada de 0-0,2 m do solo em pesquisa realizada por Silva et al. (2013).

Siqueira et al. (2015b) na mesma área experimental, demonstraram a estabilidade do semivariograma tanto para o número total de pontos, quanto para dois compartimentos, no entanto, tal fato ocorreu em diferentes escalas. Com o número total de medições os dados da umidade se ajustaram ao modelo esférico e com a diminuição do número de pontos com o aumento do espaçamento os dados se ajustaram ao modelo gaussiano.

Tabela 3. Parâmetros da análise semivariográfica dos valores da condutividade elétrica do extrato aparente do solo (CEa), condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), umidade (U) e da textura do solo.

Variáveis		C ₀	C ₀ +C ₁	A ₀ (m)	GD (%)	Classificação	Modelo	R ²
CEa (mS m ⁻¹)	V	0,32	8,52	65	37	Moderada	Esférico	0,627
	H	2,70	5,30	57	50	Moderada	Esférico	0,235
CEes (dS m ⁻¹)	0-0,2 m	0,02	0,0343	121	58	Moderada	Gaussiano	0,896
	0,2-0,4 m	0,0042	0,0076	199	55	Moderada	Gaussiano	0,999
U (θ)	0-0,2 m	1,00	19,50	65	5	Forte	Esférico	0,465
	0,2-0,4 m	0,80	34,80	120	2	Forte	Exponencial	0,849
Resíduos U (θ)	0-0,2 m	1,00	18,30	55	6	Forte	Esférico	0,406
	0,2-0,4 m	0,10	31,10	110	1	Forte	Exponencial	0,486
Argila (g kg ⁻¹)	0-0,2 m	-	-	-	-		EPP	-
	0,2-0,4 m	0,69	3,926	70	18	Forte	Exponencial	0,850
Silte (g kg ⁻¹)	0-0,2 m	-	-	-	-		EPP	-
	0,2-0,4 m	-	-	-	-		EPP	-
Areia (g kg ⁻¹)	0-0,2 m	-	-	-	-		EPP	-
	0,2-0,4 m	-	-	-	-		EPP	-

* C₀-Efeito pepita, C₀+C₁-Patamar, A₀-Alcance, GD-Grau de dependência, R²-coeficiente de determinação, EPP-Efeito Pepita Puro.

Não houve ajuste para os semivariogramas dos dados de silte e areia para as duas camadas e, da argila na camada de 0-0,2 m do solo. Pois os mesmos apresentaram efeito pepita puro, ou seja, não houve dependência espacial, recomenda-se a redução do espaçamento na

próxima amostragem, para detectar a variabilidade espacial da granulometria. Resultados semelhantes foram encontrados em 2011 na mesma área por Siqueira et al. (2015a).

Os semivariogramas da CEes nas duas camadas (121 e 199) e U na camada de 0,20-0,40m (120) apresentaram os maiores alcances (m) (Tabela 3). Siqueira et al. (2015a) obteve maiores alcances para CEa de 180 m e mesmo para argila de 70 m. Siqueira et al. (2015b) obteve alcance de 121m para U nas duas camadas.

Segundo Cambardella et al. (1994), os dados de U nas duas camadas e argila na camada de 0,2-0,4m, apresentaram forte dependência espacial, devido os valores inferiores a 25%. Siqueira et al. (2015b) na mesma área verificaram grau de dependência espacial forte para U nas diferentes camadas (0,0-0,2m, 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m) e para os diferentes espaçamentos (3, 6, 9, 12 e 15 m), que caracterizam forte dependência, indicando elevada relação entre as amostras desse atributo na área experimental.

Os valores de CEa e CEes (Tabela 3), permite inferir moderada dependência espacial (25 e 75%). Siqueira et al. (2015a) obtiveram elevada dependência espacial com CEa nas duas posições, 17,64 e 22,22%, respectivamente ($GD \leq 25\%$). Resultados semelhantes foram encontrados por Alves et al. (2013) com a CEes na camada de 0-0,2m com moderada dependência espacial ($GD=50\%$) e diferiram em relação a camada de 0,20-0,40m ($GD= 91\%$) que obteve dependência fraca $> 75\%$.

A variabilidade dos atributos do solo pode ser atribuída a fatores intrínsecos ou extrínsecos; no primeiro caso, predominam os fatores relacionados à formação do solo (mineralogia, textura), enquanto, no segundo, estão mais relacionados com as práticas de manejo adotadas. Geralmente, uma forte dependência espacial dos atributos do solo é atribuída aos fatores intrínsecos; aos extrínsecos, uma fraca dependência (Cambardella et al., 1994; Carvalho et al., 2003).

Para melhorar a visualização da distribuição espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), umidade (U) e da textura do solo, foram confeccionados mapas de isolinhas adotando-se a técnica da krigagem (Figura 4).

Os mapas de isolinhas da CEa, CEes e U apresentaram homogeneidade com o mapa topográfico, demonstraram que existe um padrão de variabilidade espacial similar (Figura 4). Conforme comentado anteriormente, o fator determinante foi a U do solo, pois a mesma influenciou os valores de CE no perfil do solo, pois o relevo e o nível freático foram os fatores que mais interferiram na distribuição espacial de todos os atributos estudados.

Mesmo padrão de distribuição espacial entre os mapas da CEa e topográfico foram encontrados por Siqueira et al. (2015a). Segundo Fritz et al. (1998) a condutividade elétrica é influenciada pelo conteúdo de água, sais, topografia, e pelo material de origem na formação do solo.

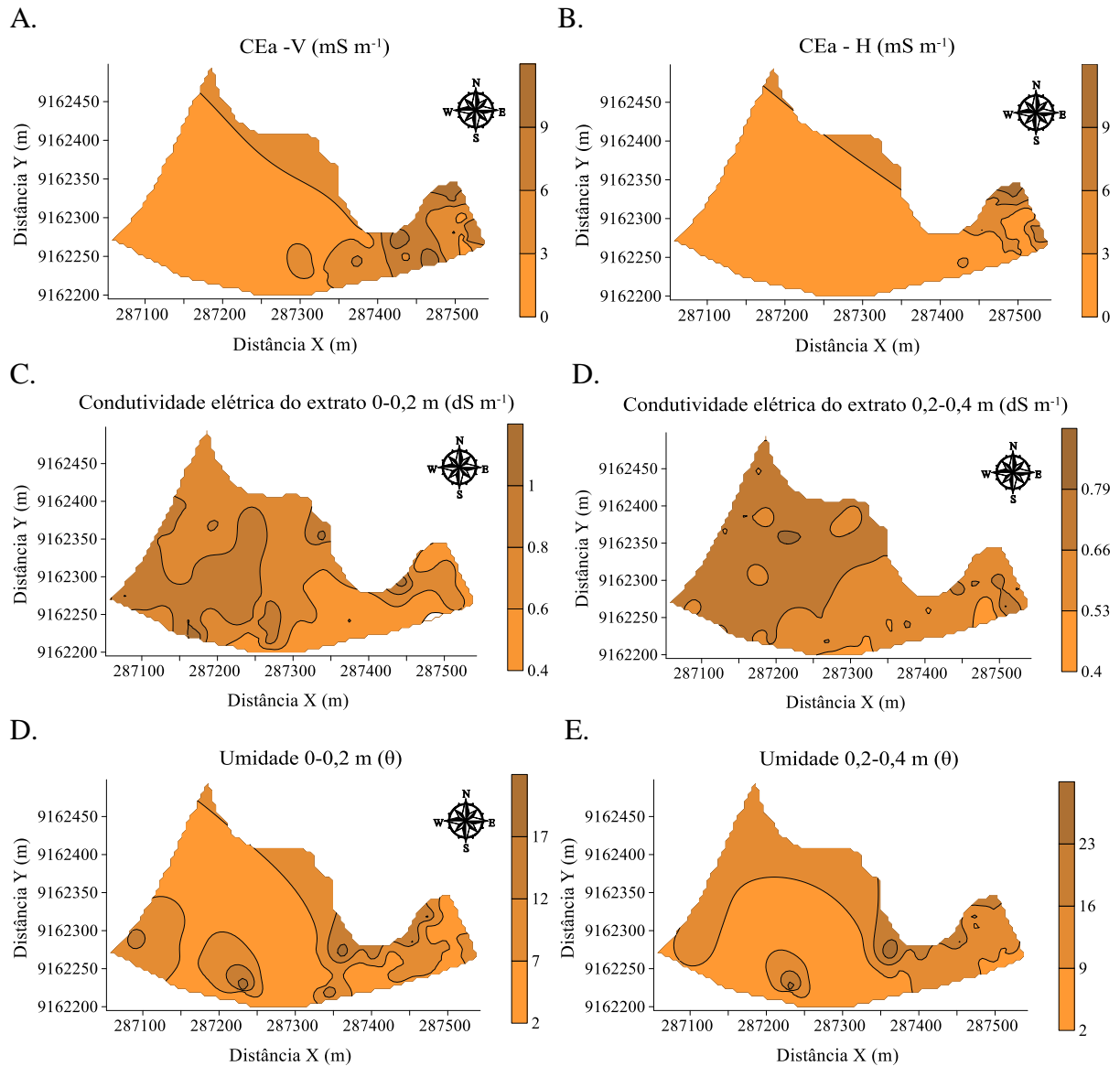


Figura 4. Mapa de isolinhas: da condutividade elétrica aparente do solo medida por indução eletromagnética (A) na posição vertical e (B) na posição horizontal; condutividade elétrica do extrato saturação (C) na camada de 0-0,20 m e (D) de 0,20-0,40 m; umidade volumétrica medida com TDR (E) na camada de 0-0,20 m e (F) de 0,20-0,40.

Entretanto, os mapas da CEa foram inversamente proporcionais aos de CEes nas duas camadas do solo. Porém, ocorreu similaridade entre os mapas temáticos de CEes e U na camada

de 0-0,2 m (Figura 4) e a da argila na camada de 0,2-0,4 m do solo (Figura 5), que obtiveram o mesmo padrão espacial, conseqüentemente, foram inversamente proporcionais ao mapa topográfico (Figura 2). Com isso, o valor obtido para a CE de um solo é afetado principalmente pelo conteúdo de água e sais dissolvidos (Freeland, 1989).

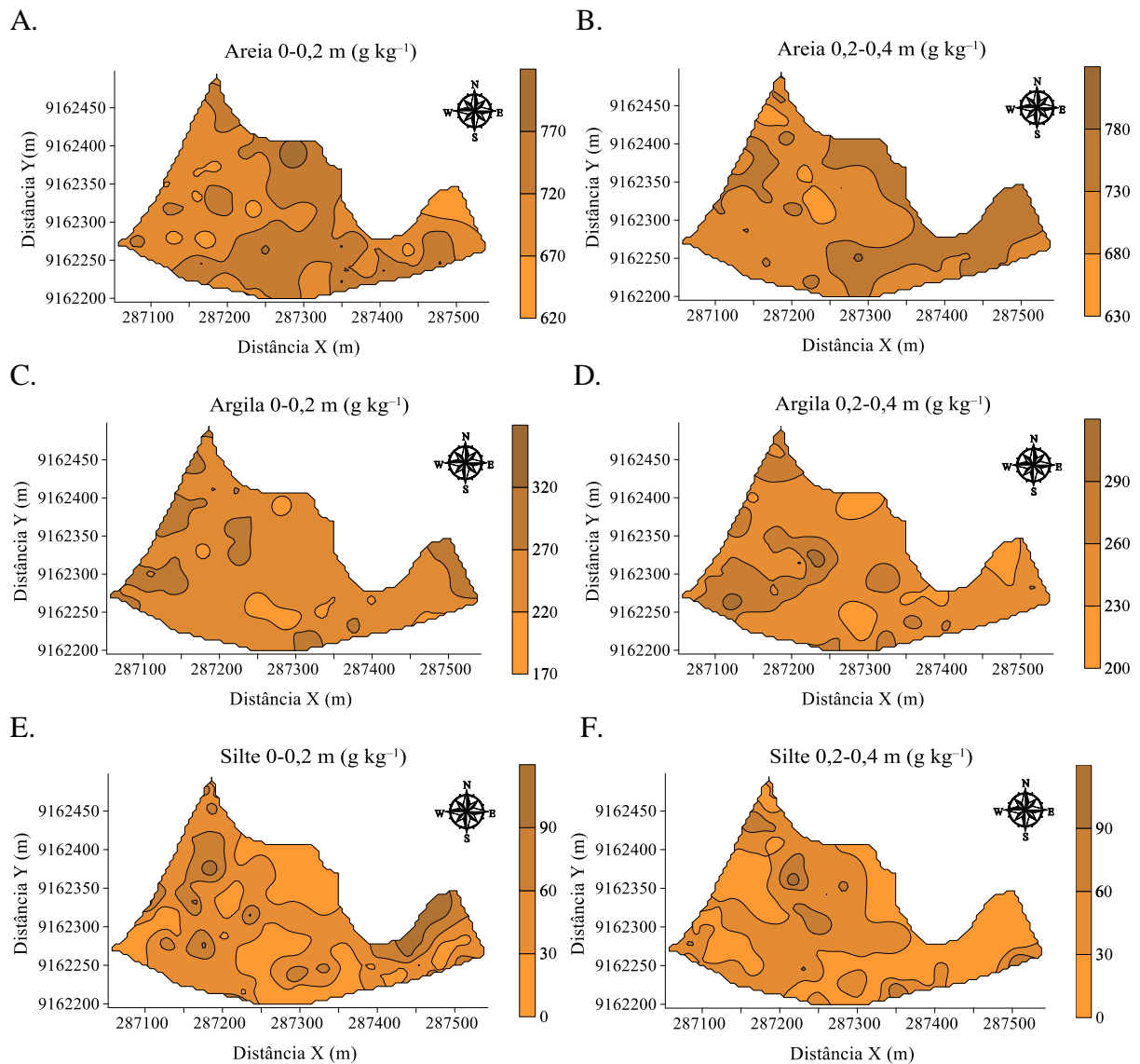


Figura 5. Mapa de isolinhas: da areia (A) na camada de 0-0,20 m e (B) de 0,20-0,40 m; argila (C) na camada de 0-0,20 m e (D) de 0,20-0,40 m; silte (E) na camada de 0-0,20 m e (F) de 0,20-0,40 m do solo.

Observou-se que na parte onde a área apresenta sua menor largura e sua maior cota topográfica (Figura 2) estão localizados os menores valores de CEes (Figura 4) e argila, e maiores valores de CEa e U também na parte

superior esquerda do mapa onde ocorrem as menores cotas topográficas, evidenciando que o excesso de umidade influencia na variabilidade dos atributos do solo (Artur et al., 2014; Siqueira et al., 2015a). Os mapas da CEes apresentaram maior concentração de sais na parte baixa da área, na mesma ocorreu aumento da argila (Figura 4).

Siqueira et al. (2015a) verificaram nos mapas de variabilidade espacial dos atributos texturais (argila, silte e areia) na camada de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m de profundidade que não houve relação entre os mapas de CEa-V e CEa-H.

A correlação espacial que explicou a variabilidade espacial da umidade foi o atributo que mais influenciou na distribuição da CE (Figura 4). Segundo Auerswald et al. (2001) a variação espacial da CE do solo pode ser atribuída às variações topográficas do terreno o que confirma o resultado deste trabalho.

As correlações lineares de Pearson significativos a 5%, entre a CEa com os atributos de solo, mostraram coeficientes de correlação baixos para todos os atributos do solo estudados (Tabela 4). A CEa-V obteve correlação linear moderada positiva ($r= 0,68$) com a medida na posição horizontal, justifica-se que esse valor de correlação se deve à natureza de medição de ambas as propriedades, pois de acordo com Lesch et al. (2005), até 80% da resposta obtida com o dipolo vertical (CEa-V) é oriunda da camada superficial do solo (CEa-H), e fraca correlação positiva com a areia nas duas camadas ($r= 0,26$ e $0,28$), com a U na camada de 0,20-0,40m ($r=0,35$) e negativa com o silte de 0,20-0,40m do solo ($-0,23$). Corroborando com a correlação entre os mapas temáticos de CEa e U, como comentado anteriormente que a U é um fator determinante para CEa e são propriedades dinâmicas dos solos e proporcionais.

A maior contribuição para a leitura da CEa do EM38 está na camada situada a aproximadamente 40 cm de profundidade, para o modo vertical, e a 0 (zero) para o modo horizontal, assumindo-se o equipamento disposto na superfície do solo; assim, locais em que a leitura aparente medidas na posição horizontal é superior à na posição vertical, tendem a apresentar perfil com maior salinidade próxima à superfície do solo (Geonics, 1999).

Em relação a CEa-H também apresentou correlações fracas com algumas variáveis, sendo os valores proporcionais com a U ($r= 0,39$) e areia nas duas camadas ($r= 0,31$ e $0,29$) e, inversamente proporcionais com a argila ($r= -0,27$). Siqueira et al. (2015a) obteve fracas correlações entre a CEa e textura, corroborando com os resultados presente trabalho.

Tabela 4. Correlação linear entre a da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), umidade (U) e da textura do solo (areia, silte e argila).

	Camada	CEa (mS m ⁻¹)		CEes (dS m ⁻¹)		U (θ)		Argila (g kg ⁻¹)		Silte (g kg ⁻¹)		Areia (g kg ⁻¹)	
		V	H	0-0,2 m	0,2-0,4 m	0-0,2 m	0,2-0,4 m	0-0,2 m	0,2-0,4 m	0-0,2 m	0,2-0,4 m	0-0,2 m	0,2-0,4 m
CEa (mS m ⁻¹)	M												
	V	1,00											
	H	0,68*	1,00										
CEes (dS m ⁻¹)	0-0,2 m	-0,09	-0,21	1,00									
	0,2-0,4 m	-0,12	-0,20	0,69*	1,00								
U (θ)	0-0,2 m	0,16	0,22	0,13	0,09	1,00							
	0,2-0,4 m	0,35*	0,39*	-0,06	-0,08	0,76*	1,00						
Argila (g kg ⁻¹)	0-0,2 m	-0,16	-0,22	0,07	0,04	0,10	-0,13	1,00					
	0,2-0,4 m	-0,15	-0,27*	0,00	0,04	0,15	-0,01	0,48*	1,00				
Silte (g kg ⁻¹)	0-0,2 m	-0,15	-0,16	0,04	0,06	-0,13	-0,15	-0,30*	-0,11	1,00			
	0,2-0,4 m	-0,23*	-0,14	-0,10	-0,16	-0,18	-0,19	0,02	-0,05	-0,01	1,00		
Areia (g kg ⁻¹)	0-0,2 m	0,26*	0,31*	-0,09	-0,09	0,03	0,24*	-0,54*	-0,29*	-0,65	-0,01	1,00	
	0,2-0,4 m	0,28*	0,29*	0,08	0,09	0,03	0,15	-0,35*	-0,64*	0,08	-0,74*	0,21	1,00

*Correlação Pearson; Significativo a 5% de probabilidade pelo teste.

Quanto maior foi o teor de areia e U do solo, mais elevados foram os valores de CEa e baixos os de silte e argila. A fraca correlação entre a CEa e textura pode ser explicada porque está relacionada com o processo de formação do solo na área de estudo que se baseia na sedimentação, fazendo com que as partículas mais finas se acomodassem em profundidade e as partículas mais grossas na camada superior (Brasil, 1972).

A ocorrência de baixos valores de correlação linear entre a textura e a CEa-V e a CEa-H não era esperado, visto que, o conteúdo de argila no solo é o atributo que mais interfere na manifestação dos valores de CEa-V e a CEa-H (McNeill, 1980; Lesch et al., 2005; Sudduth et al., 2005; Kühn et al., 2009; Siqueira et al., 2009; 2015a). A ocorrência desse fato está relacionada ao lençol freático raso no momento das amostragens dos demais atributos do solo em estudo.

Não houve correlação entre a CEes e os demais atributos do solo, ocorreu apenas correlação moderada positiva entre as camadas da mesma ($r= 0,69$). A baixa concentração de sais no solo na área experimental pode ter contribuído para falta de correlação com os atributos de solo.

A U na camada de 0,2-0,4m obteve correlações fracas positiva com a mesma na camada e areia de 0-0,20m do solo ($r= 0,76$ e $0,24$).

A textura do solo apresentou correlações fracas positivas entre a argila na camada de 0-0,2m e 0,20-0,4m ($r= 0,48$) e, negativa com silte de 0-0,2m ($r= -0,30$) e areia de 0,2-0,4m ($r= -0,35$), e moderada com a areia de 0-0,2m de solo ($r= -0,54$). A argila na camada de 0,2-0,4m obteve correlações negativa fraca com a areia de 0-0,20m ($r= -0,29$) e moderada com a camada de 0,2-0,4m de solo ($r= -0,64$). Verificou-se que a correlação entre o silte e areia na camada de 0-0,2m e 0,2-0,4m de solo foram moderadas negativas ($r= -0,65$ e $-0,74$). Valores de correlação linear negativos entre a granulometria já eram esperados, visto que, com o aumento do teor de areia na área experimental, ocorre uma redução da argila e silte. Resultados semelhantes foram encontrados por Siqueira et al. (2015a).

3.6. CONCLUSÕES

- A análise geoestatística demonstrou que o modelo esférico foi o que melhor se ajustou para os semivariogramas dos dados;

- A condutividade elétrica medida por indução eletromagnética demonstrou-se como uma importante ferramenta para predição dos atributos do solo;

- Os mapas de distribuição espacial e a correlação linear da condutividade elétrica aparente e do extrato de saturação, e umidade do solo apresentaram mesmo padrão espacial com o mapa topográfico;

- Não houve dependência espacial para a areia e silte, demonstrando que o esquema de amostragem não foi suficiente para detectar a distribuição espacial da textura.

3.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, S. M.; Alcântara, G. R.; Reis, E. F.; Queiroz, D. M.; Valente, D. S. M. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 1, p. 104-114, 2013.

Artur, A. G.; Oliveira, D. P.; Costa, M. C. G.; Romero, R. E.; Silva, M. V. C.; Ferreira, T. O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p.141–149, 2014.

Auerswald, K.; Simon, S.; Stanjek, H. Influence of soil properties on electrical conductivity under humid water regimes. **Soil Science**, v. 166, n. 6, p. 382-390, 2001.

Brasil. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco** (Boletim Técnico, 26, Série Pedologia, 14). Recife: Convênio de mapeamento de solos MA/DNPEA-SUDENE/DRN convênio MA/ CONTAP/USAID/ETA. 1972.

Brevik, E. C. Analysis of the representation of soil map units using a common apparent electrical conductivity sampling design for the mapping of soil properties. **Soil Survey Horizons**, v. 53, n. 2, p. 32–37, 2012.

Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novack, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turco R. F.; Knopka, A. E. Field-scale variability of soil proprieties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, v. 58, p. 1240-1248, 1994.

Carvalho, M. P.; Takeda, E. Y.; Freddi, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 695-703, 2003.

- Corwin, D. L.; Lesch, S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. **Agronomy Journal**, v. 95, p. 455-471, 2003.
- Corwin, D. L.; Kaffka, S. R.; Hopmans, J. W.; Mori, Y.; Lesch, S. M.; Oster, J. D. Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil. **Geoderma**, v. 114, n. 3-4, p. 231–259, 2003.
- Corwin, D. L.; Lesch, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, p. 11-43, 2005a.
- Corwin, D. L.; Lesch, S. M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity I. Survey protocols. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, p. 103–133, 2005b.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. ed. Rio de Janeiro, 2011, 212 p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro, 2013, 353 p.
- Freeland, R. S. Review of soil moisture sensing using soil electrical conductivity. **Transaction of the ASAE**, v. 32, n. 6, p. 2190-2194, 1989.
- Fritz R. M.; Maio, D. D.; Schumacher, T. E.; Clay, D. E.; Carlson, C. G.; Ellsbury, M. M. M.; Dalsted, K. J. **Field comparison of two soil electrical conductivity measurement systems**. In: International Conference on Precision Agriculture, 4, Proceedings, St. Paul: ASA; CSSA; SSSA, p. 1211-1217, 1998.
- Geonics, EM 38. **Ground conductivity meter operating manual**. Ontário: GEONICS Ltda. 1999, 69 p.
- Golden Software. **Surfer 11.0 - user's guide**. New York: Golden Software, 2002.
- Kühn, J.; Brenning, A.; Wehrhan, M.; Koszinski, S.; Sommer, M. Interpretation of electrical conductivity patterns by soil properties and geological maps for precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 10, p. 490-507, 2009.

- Lesch, S. M.; Corwin, D. L.; Robinson, D. A. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, p. 351-378, 2005.
- McNeill, J. D. **Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers**. Technical Note, TN-6, Geonics Ltda, Ontario, 1980, 15 p.
- Richards, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: U. S. Government Printing, Office, D. C. Dep. Agric. Handbook 60. 1954, 160 p.
- Robertson, G.P. **GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998, 152 p.
- Shaner, D. L.; Farahani, H. J.; Buchleiter, G. W. Predicting and Mapping Herbicide–Soil Partition Coefficients for EPTC, Metribuzin, and Metolachlor on Three Colorado Fields. **Weed Science**, v. 56, p. 133–139, 2008.
- Silva, J. S.; Montenegro, A. A. A.; Silva, E. F. F.; Andrade, C. W. L.; Silva, J. R. L. Distribuição Espacial da Condutividade Elétrica e Matéria Orgânica em Neossolo Flúvico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 764-776, 2013.
- Siqueira, G. M.; Dafonte, J.; Paz González, A. **Estimación de la textura y contenido de agua en el suelo a partir de datos de conductividad eléctrica utilizando geoestadística multivariante**. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, v. 9, p. 228-235, 2009.
- Siqueira, G. M.; Silva, E. F. F.; Dafonte, J. D. Distribuição espacial da condutividade elétrica do solo medida por indução eletromagnética e da produtividade de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 215-223, 2015a.
- Siqueira, G. M.; Silva, J. S.; Bezerra, J. M.; Silva, E. F. F.; Dafonte, J. D.; Melo, R. F. Estacionariedade do conteúdo de água de um Espodossolo Humilúvico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n.5, p. 439–448, 2015b.
- StatSoft – **Statistica. Data Analysis Software System**. versão 7.0, (www.statsoft.com), 2004.

- Sudduth, K. A.; Kitchen, N. R.; Wiebold, W. J.; Batchelor, W. D.; Bollero, G. A.; Bullock, D. G.; Clay, D. E.; Palm, H. L.; Piercef, F. J.; Schuler, R. T.; Thelen, K. D. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, p. 263-283, 2005.
- Triantafilis, J.; Lesch, S. M.; Lau, K. L.; Buchanan, S.M. Field level digital soil mapping of cation exchange capacity using electromagnetic induction and a hierarchical spatial regression model. **Australian Journal of Soil Research**, v. 47, p. 651–663, 2009.
- Vieira, S. R. **Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo**: In Novais, R.F.; Alvarez V., V. H.; Schaefer, C. E. G. R. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-55, 2000.
- Vieira, S. R.; Hatfield, J. L.; Nielsen, D. R.; Biggar, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.
- Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (ed.). Application of soil physics, New York: **Academic Press**, p.319-324, 1980.

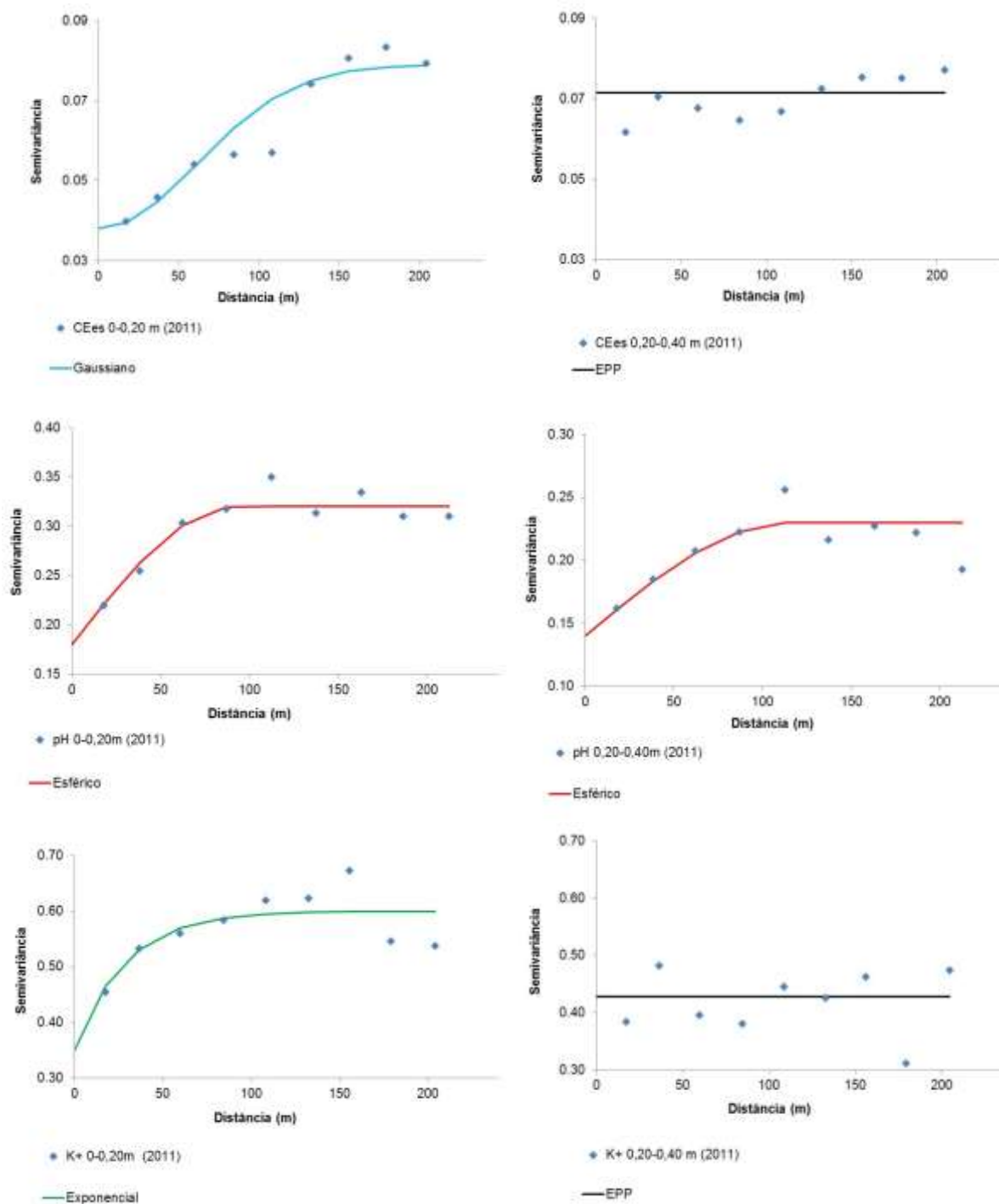
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A variabilidade espacial dos atributos físicos (textura e umidade), sais solúveis (condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico, concentrações de cálcio, magnésio, sódio, potássio, bicarbonato, cloreto e sulfato) do solo e da produtividade de cana-de-açúcar em sequeiro, delimitou zonas de manejo específico. A prática da agricultura de precisão favorecerá na diminuição dos custos de produção e o aumento da produção e qualidade ambiental.

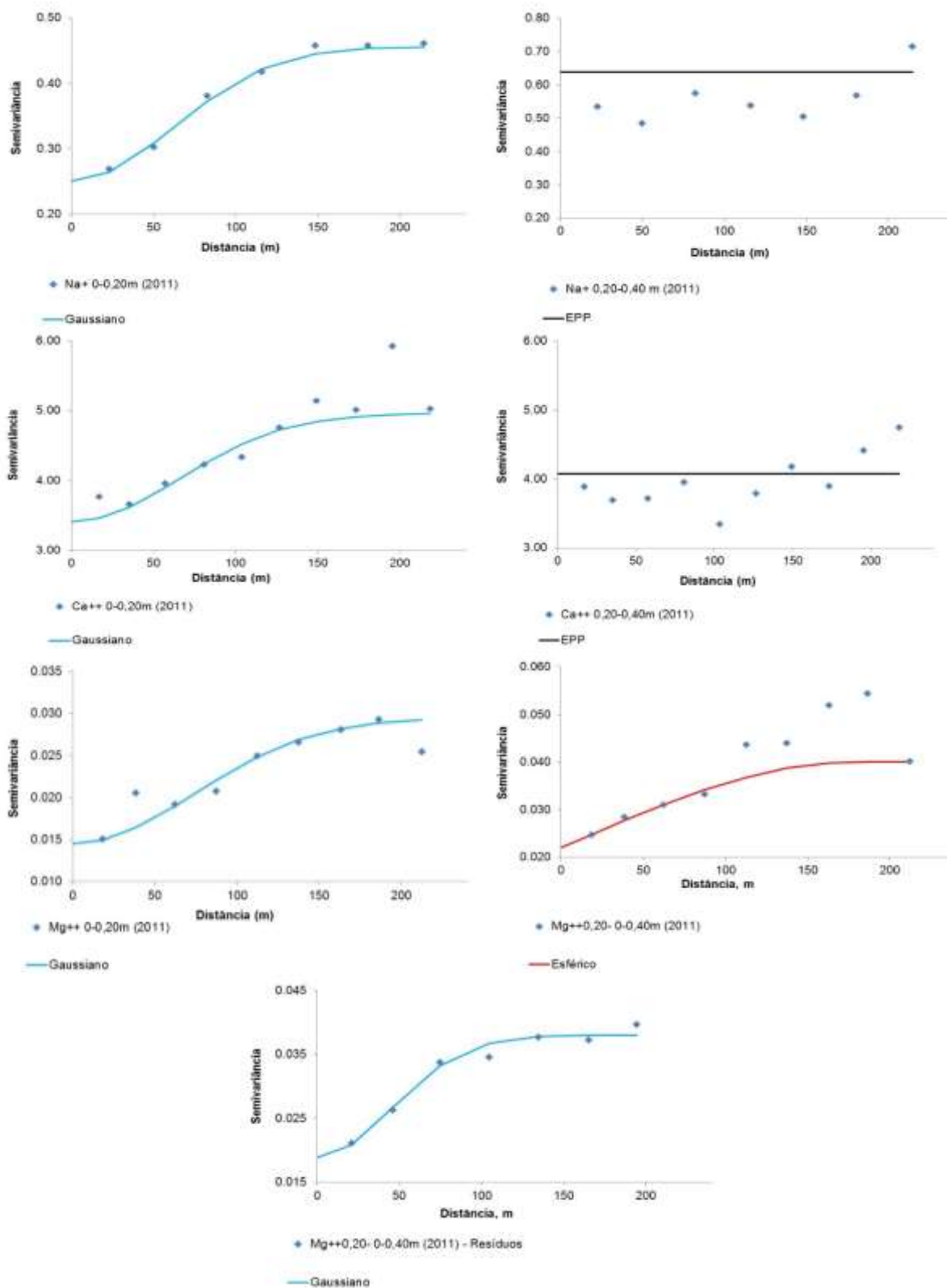
O estudo da variabilidade espacial e temporal da produtividade de cana-de-açúcar, e a influência de um ou mais atributos do solo sobre a produtividade, favorecerá na tomada de decisão no processo de produção, bem como definir parâmetros que contribuíssem para uma amostragem otimizada dos atributos físicos e químicos do solo, favorecendo a diminuição dos custos com amostragem.

5. APÊNDICE 1

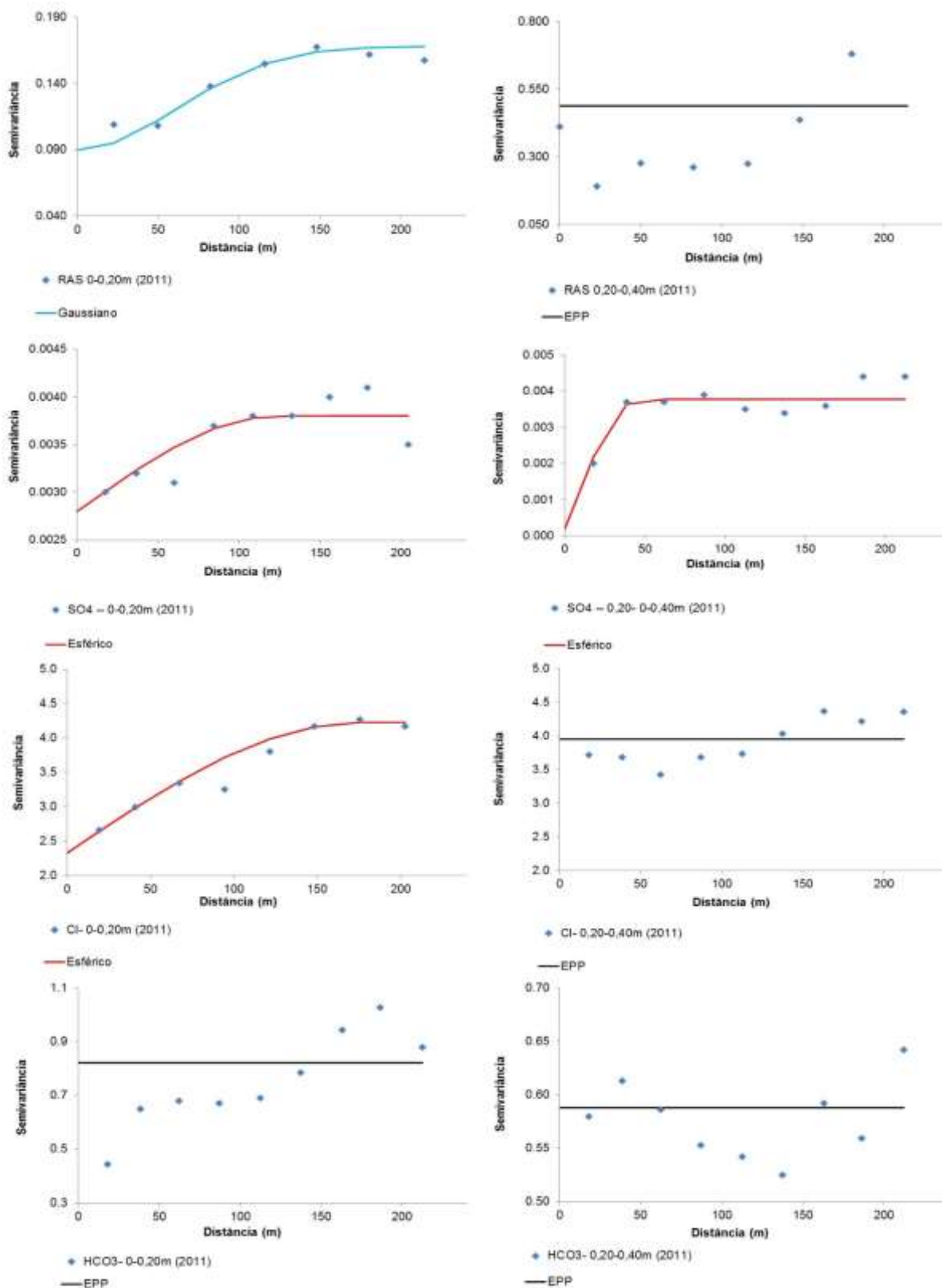
APÊNDICE 1 (Capítulo II)



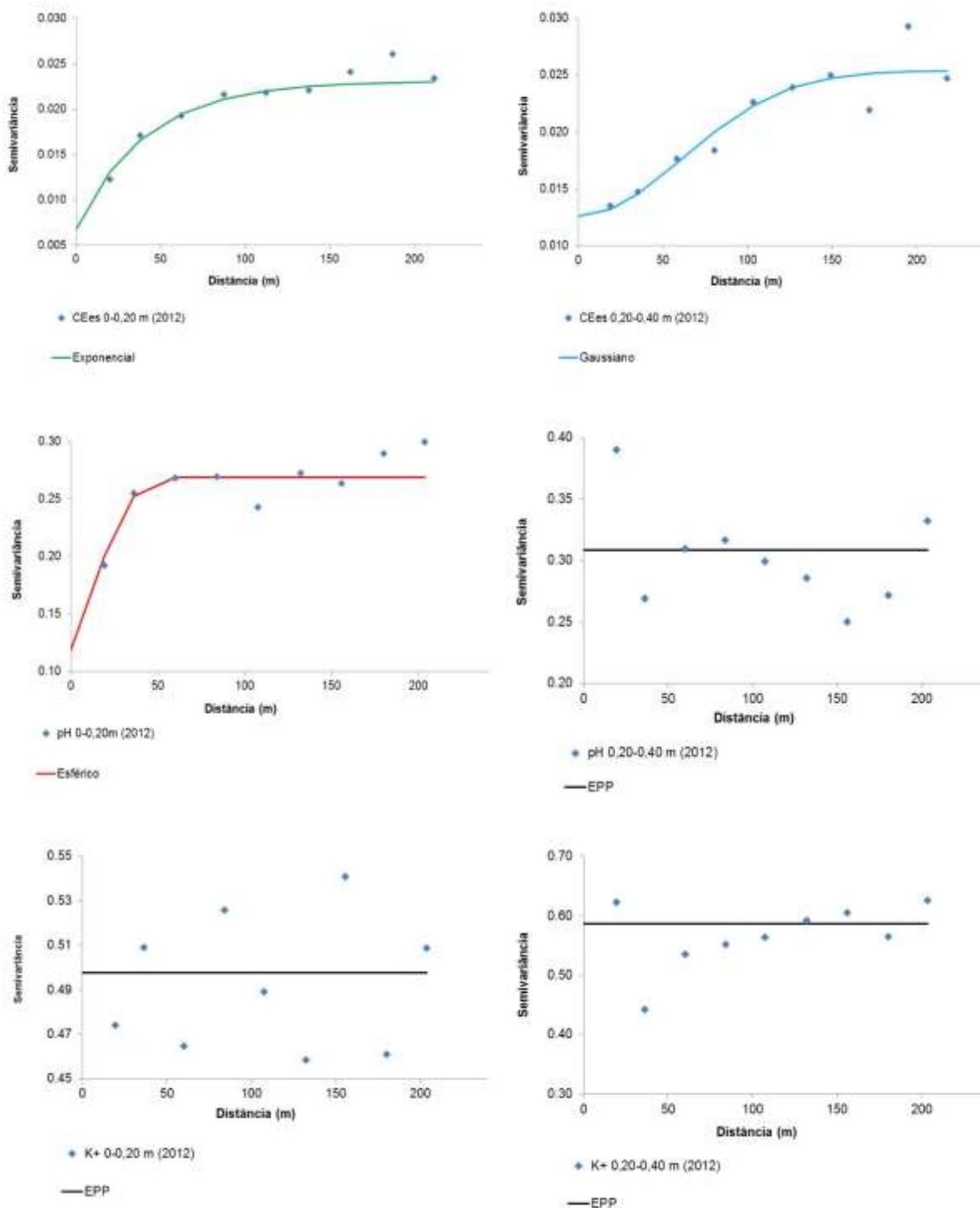
Semivariogramas da safra 2011/2012: Condutividade elétrica do extrato saturação (CEes) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo; potencial hidrogeniônico (pH) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo e potássio (K^+) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo.



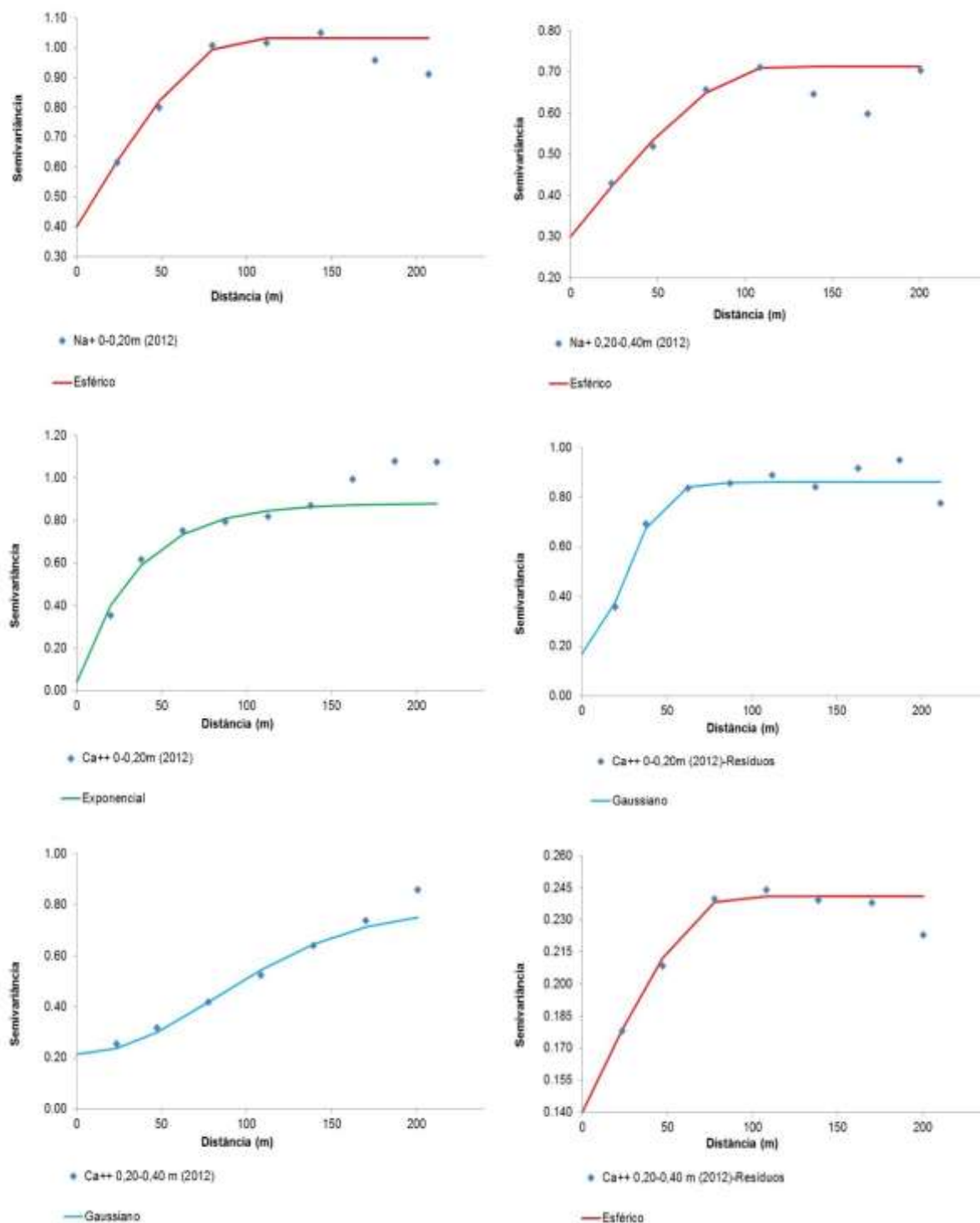
Semivariogramas da safra 2011/2012: Sódio (Na⁺) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo; cálcio (Ca²⁺) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo e magnésio (Mg²⁺) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo.



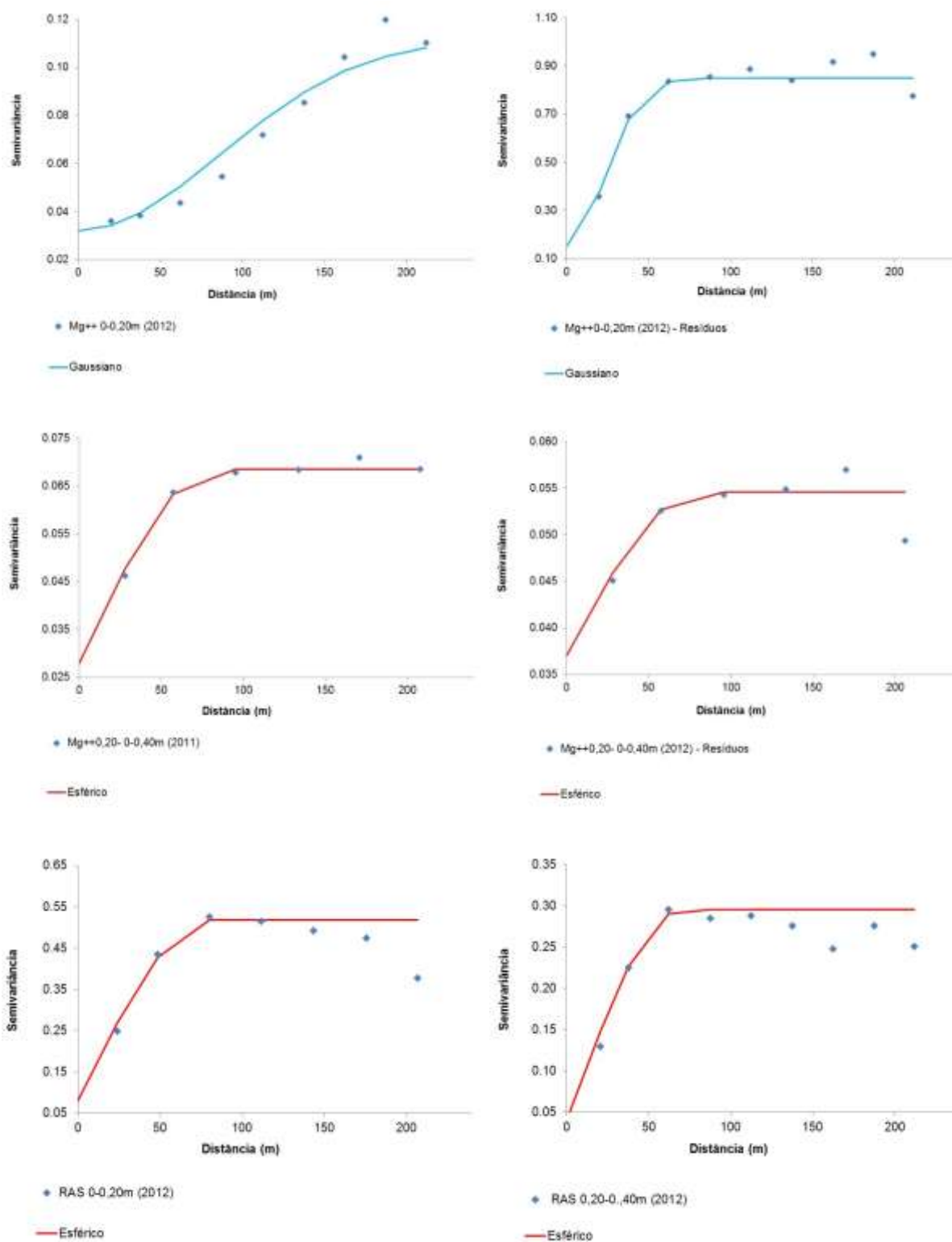
Semivariogramas da safra 2011/2012: Relação de adsorção de sódio (RAS) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo; sulfato (SO_4^{2-}) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo; cloreto (Cl^-) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo e bicarbonato (HCO_3^-) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo.



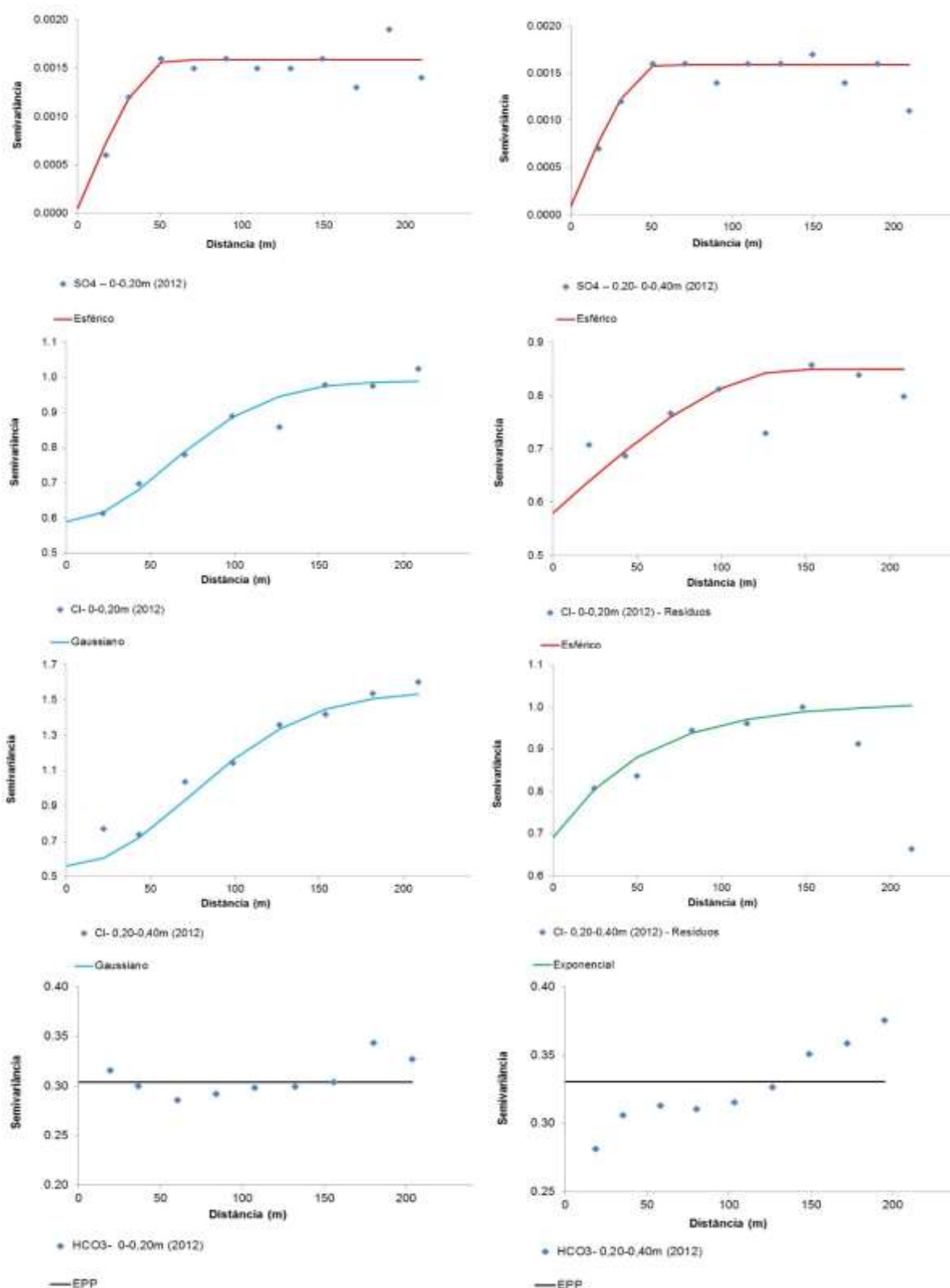
Semivariogramas da safra 2012/2013: Condutividade elétrica do extrato saturação (CEes) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo; potencial hidrogeniônico (pH) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo e potássio (K^+) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo.



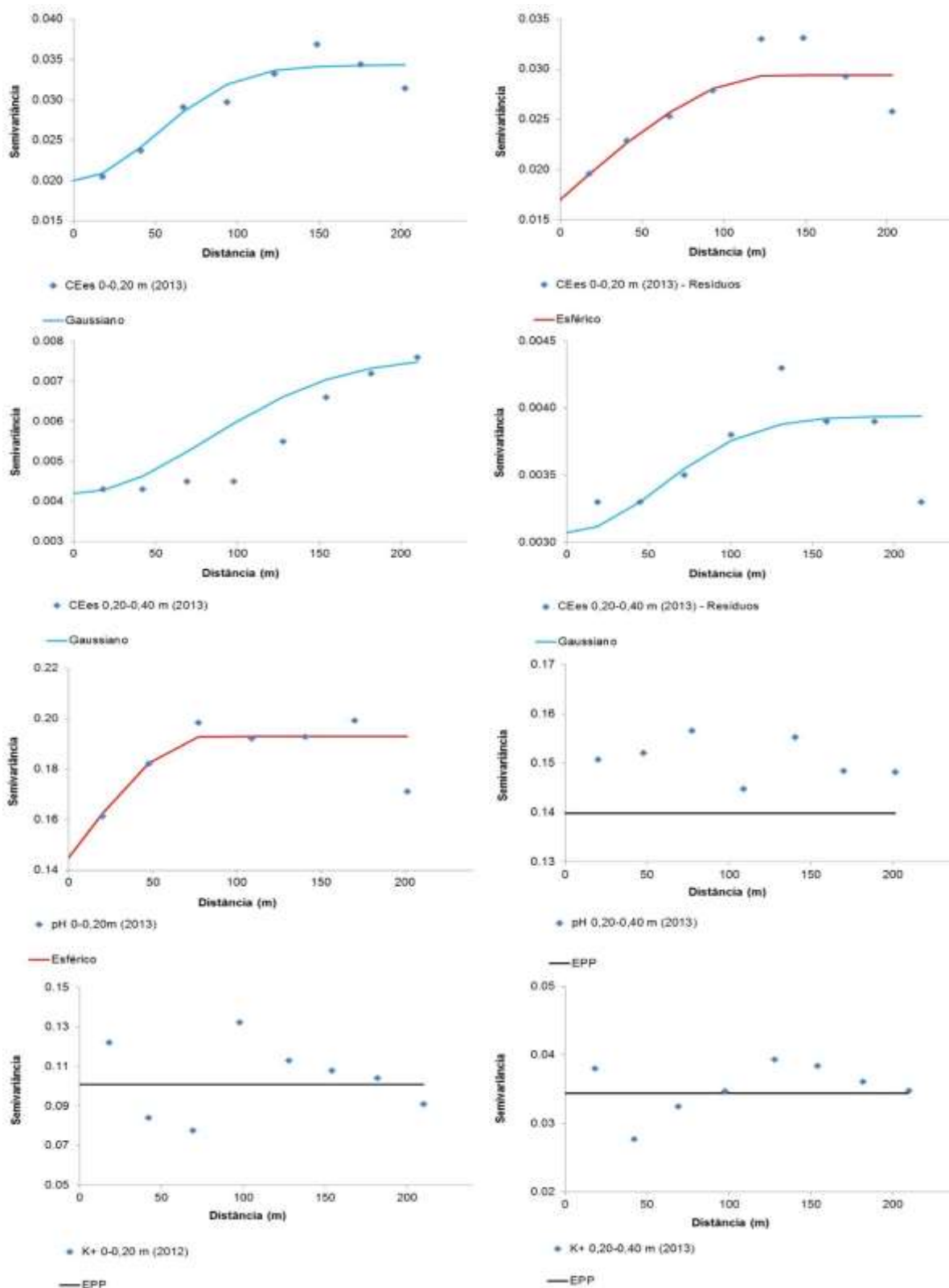
Semivariogramas da safra 2012/2013: Sódio (Na^+) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo e cálcio (Ca^{2+}) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo.



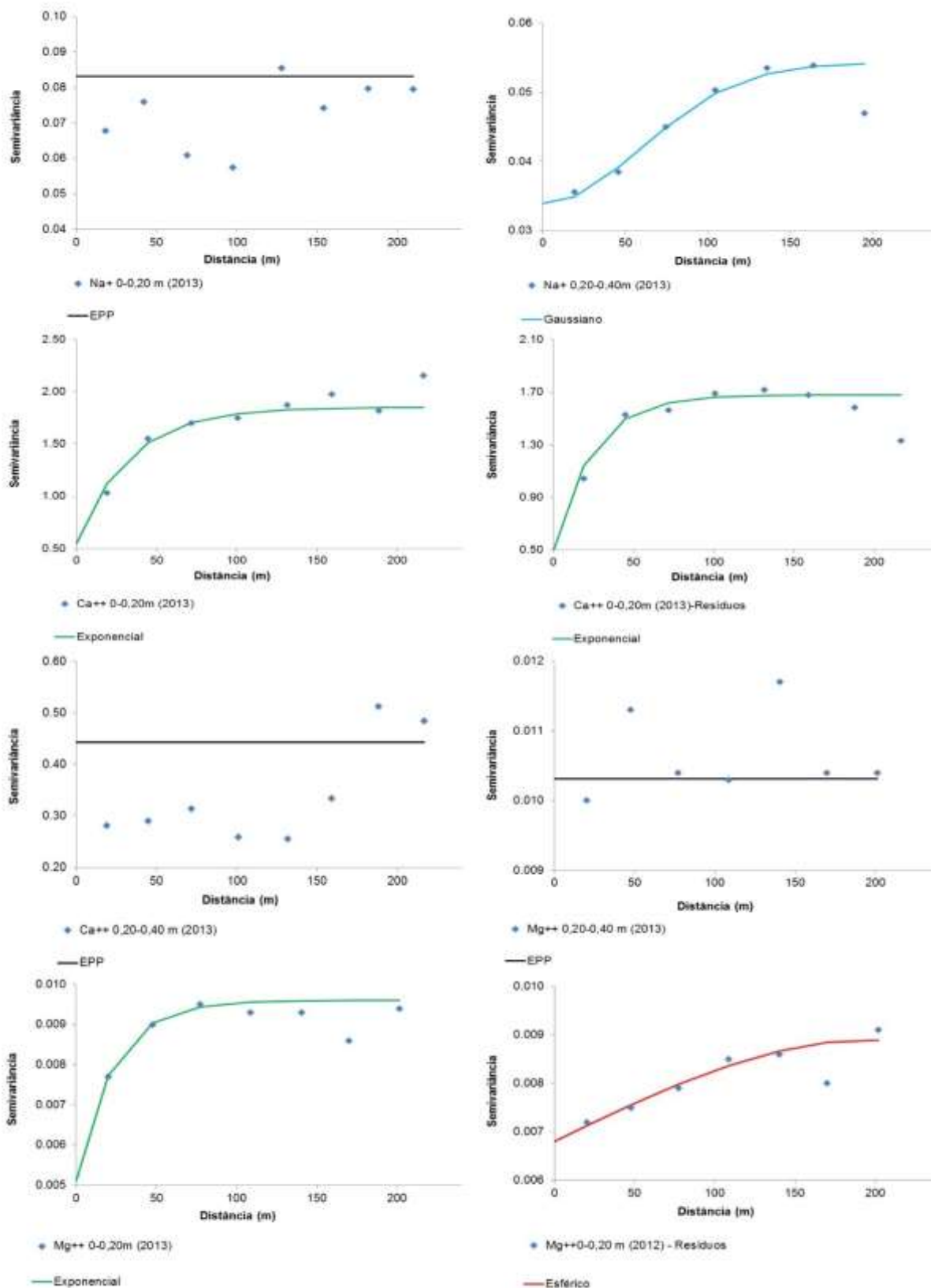
Semivariogramas da safra 2012/2013: Magnésio (Mg^{2+}) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo e relação de adsorção de sódio (RAS) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo.



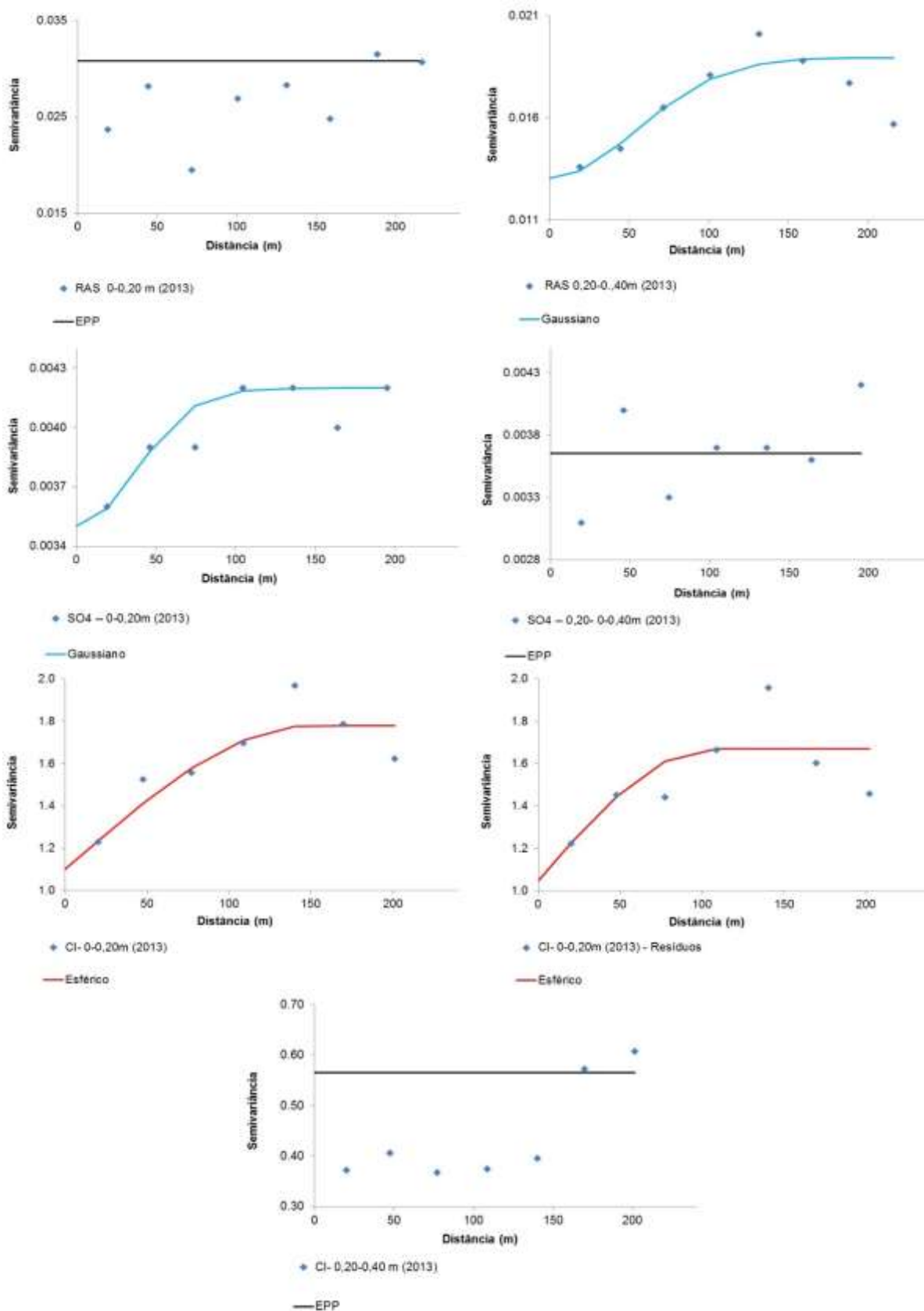
Semivariogramas da safra 2012/2013: Sulfato (SO_4^{2-}) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo; cloreto (Cl^-) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo e bicarbonato (HCO_3^-) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo.



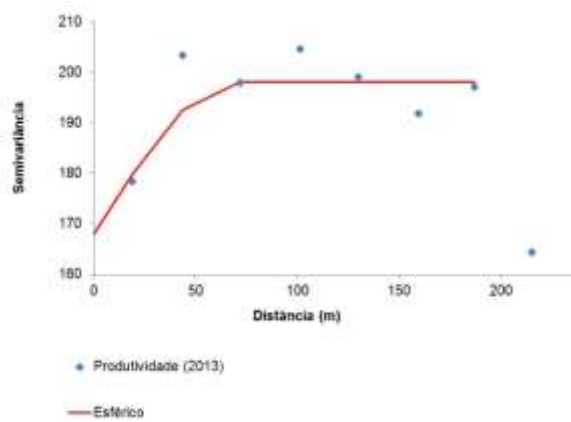
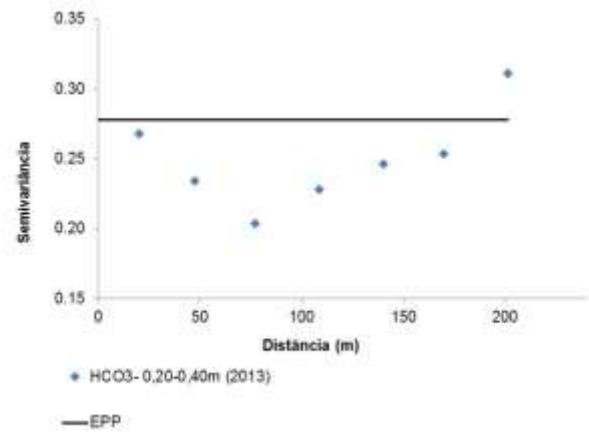
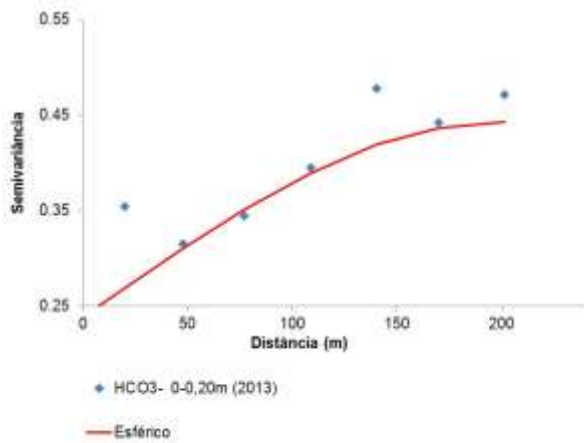
Semivariogramas da safra 2013/2014: Condutividade elétrica do extrato saturação (CEes) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo; potencial hidrogeniônico (pH) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo e potássio (K^+) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo.



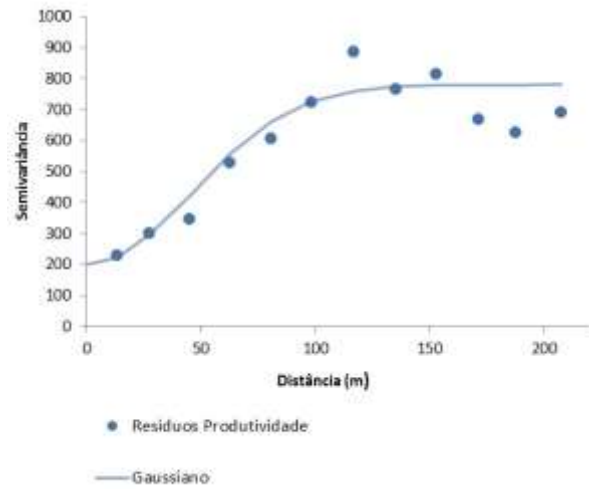
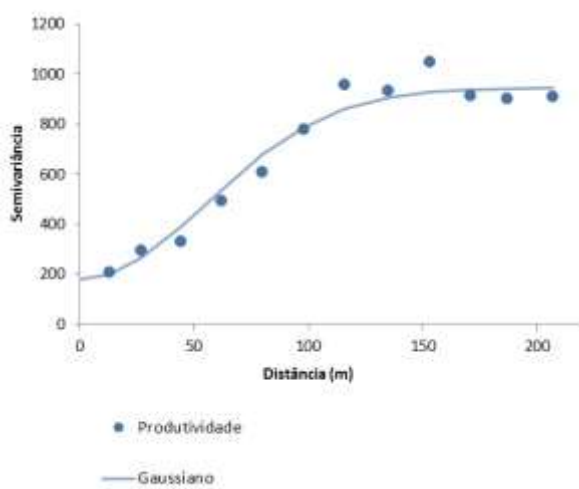
Semivariogramas da safra 2013/2014: Sódio (Na^+) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo; cálcio (Ca^{2+}) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo e magnésio (Mg^{2+}) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo.



Semivariogramas da safra 2013/2014: Relação de adsorção de sódio (RAS) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo; sulfato (SO_4^{2-}) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo e cloreto (Cl) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m do solo.



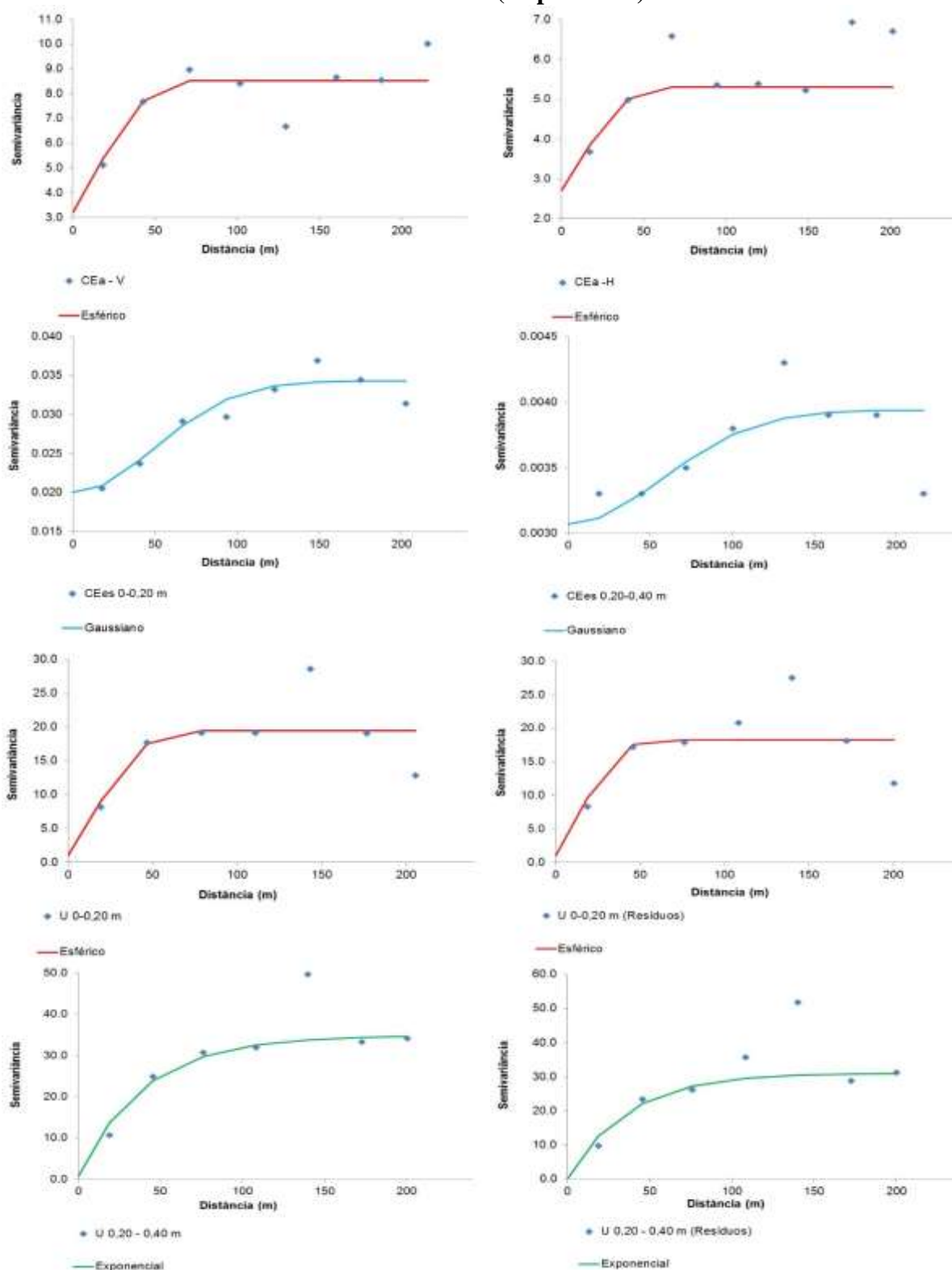
Semivariogramas da safra 2013/2014: Bicarbonato (HCO₃⁻) na camada de 0-0,20 m, de 0,20-0,40 m do solo e da produtividade da cana-de-açúcar.



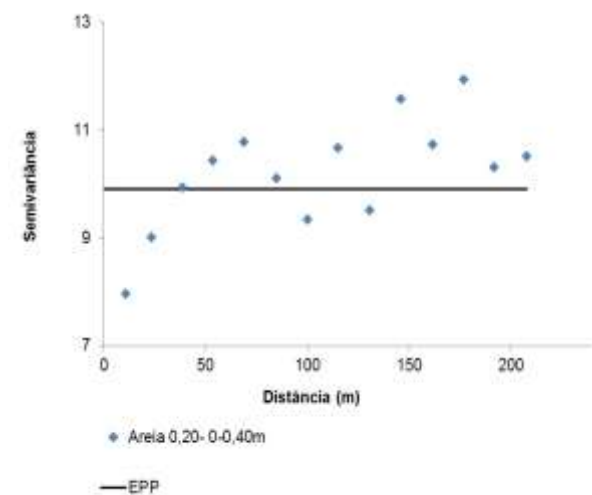
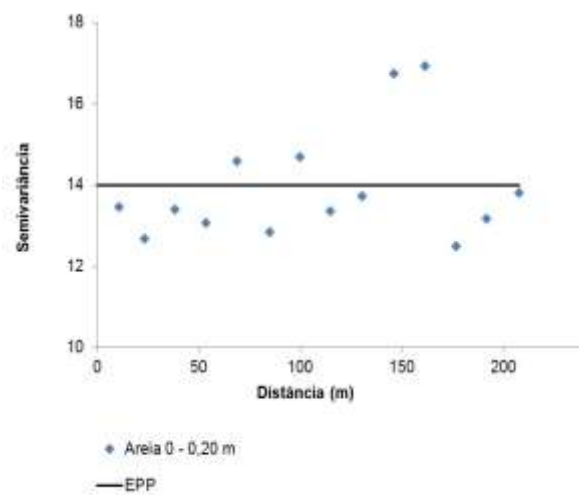
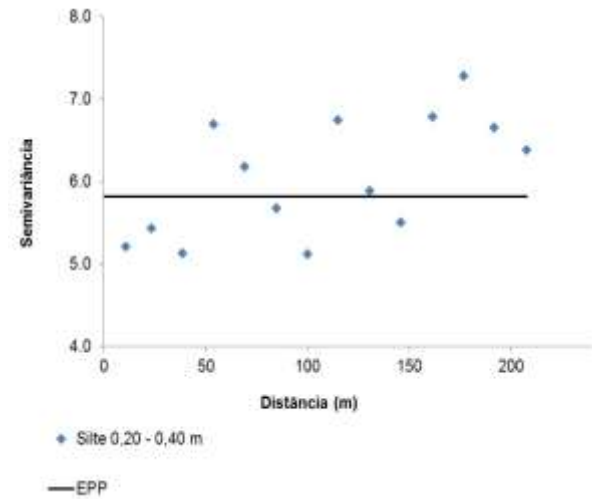
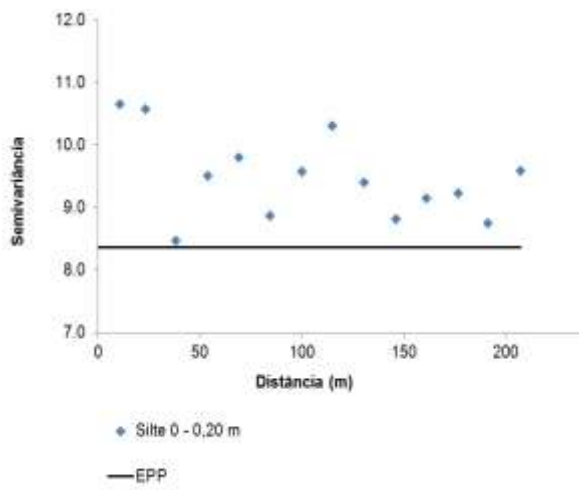
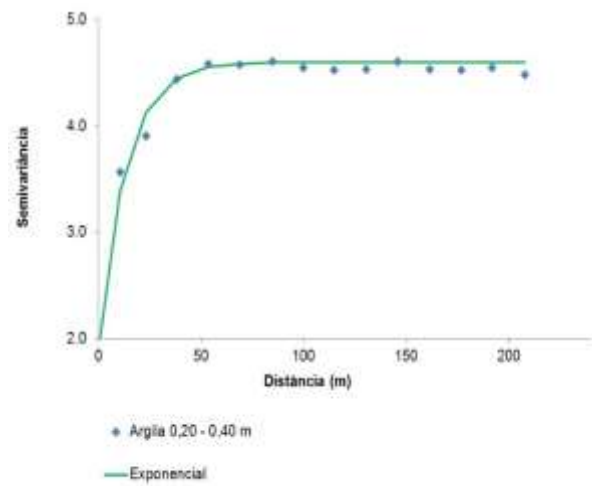
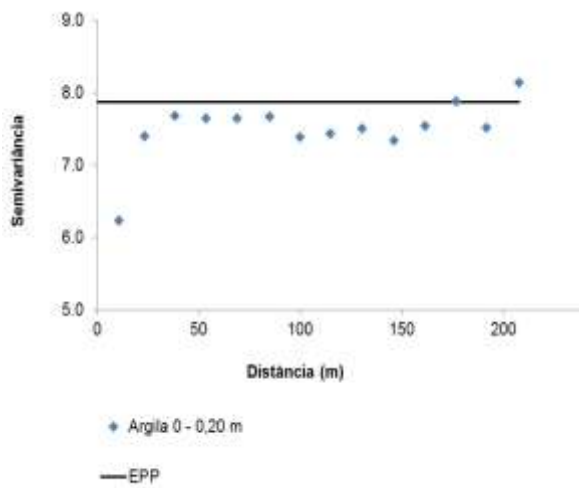
Semivariogramas da safra 2011/2012: Produtividade da cana-de-açúcar.

6. APÊNDICE 2

APÊNDICE 2 (Capítulo III)



Semivariogramas da condutividade elétrica aparente do solo medida por indução eletromagnética (CE-V) na posição vertical e (CE-H) na posição horizontal; condutividade elétrica do extrato saturação (CEes) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m e umidade volumétrica medida com TDR (U) na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40.



Semivariogramas da argila na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m; silte na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m e areia na camada de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m; do solo.