

MANOEL LEAL COSTA NETTO

**AVALIAÇÃO DA SALINIDADE DO SOLO UTILIZANDO SENSOR
DE INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA E GEOESTATÍSTICA EM
VALE ALUVIAL NO AGRESTE DE PERNAMBUCO**

RECIFE – PE

2008

MANOEL LEAL COSTA NETTO

AVALIAÇÃO DA SALINIDADE DO SOLO UTILIZANDO SENSOR
DE INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA E GEOESTATÍSTICA EM
VALE ALUVIAL NO AGRESTE DE PERNAMBUCO

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós – Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro, Ph D.

Co – Orientadora: Prof. Suzana Maria Gico Lima Montenegro, Ph D.

RECIFE - PE

2008

Ficha catalográfica

C837a Costa Netto, Manoel Leal
Avaliação da Salinidade do Solo Utilizando Sensor de Indução
Eletromagnética e Geoestatística em Vale Aluvial no Agreste de
Pernambuco / Manoel Leal Costa Netto. – 2008.
80 f.: il.

Orientador: Abelardo Antônio de Assunção Montenegro
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento
de Tecnologia Rural.
Inclui bibliografia.

CDD 631.43

1. Salinidade
2. Indução eletromagnética
3. Geoestatística
4. Salinização
5. Agreste (PE)
 - I. Montenegro, Abelardo Antônio de Assunção
 - II. Título

MANOEL LEAL COSTA NETTO

**Avaliação da Salinidade do Solo Utilizando Sensor de Indução Eletromagnética e
Geoestatística em Vale Aluvial no Agreste de Pernambuco.**

Dissertação defendida e aprovada em 29 de fevereiro de 2008 pela Banca Examinadora:

Orientador:

Abelardo Antônio de Assunção Montenegro, Prof. PhD

Examinadores:

Ênio Farias de França e Silva, Prof. Dr

João Audifax César de Albuquerque Filho, Prof. Dr

Tales Miler Soares Dr.

À minha esposa Gardênia

DEDICO

Aos meus pais Claudio e Ivoneide e irmãos Carolina e Cláudio Filho

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que sempre esta comigo e por sua misericórdia me permite acordar todos os dias e contemplar das maravilhas criadas por sua mãos.

A meus pais Claudio e Ivoneide pelo amor que sempre tive e por terem sempre se dedicado em meu aprendizado profissional e pessoal através de seus exemplos de fé, honestidade, dedicação, esperança

A minha esposa Gardênia, minha flor, por toda sua dedicação e seu esforço em conseguirmos esta conquista, pois esta caminhada só foi possível por estarmos de mãos dadas.

Aos irmãos Carolina e Claudio pelo companheirismo, amizade, e amor que compartilhamos.

A meus sobrinhos lindos Igor, Ian, Iuri e Ana luz pelos momentos de alegria...

Ao Prof. Abelardo meu grande mestre e amigo ao longo de vários anos sempre apontando os melhores caminhos, abrindo as portas do conhecimento junto comigo em grandes momento sendo mais que um orientador mas um amigo.

Ao programa da pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Professora Suzana Montenegro minha co-orientadora a vários anos da iniciação científica até hoje sempre incentivando a pesquisa e com palavras de sabedoria.

Aos amigos e amigas de Mestrado Julio, Pedro Giongo, Aérica, Adriana, Lígia Michelle, Jussálvia, Albert, George, Alexandre, Graciliano, Jose Francisco (Zezito), Sergio, Yoli e Ricardo.

Aos amigos da Sala 03 do DTR da UFRPE, Thaís, Táfnes, Ana Paula, Junior, Edimilson, Adriano, Eduardo, Francisco, José Roberto, Edivan, Robertson, Issac, Cléber pela amizade e pelo apoio nos trabalhos.

Aos professores em especial, Enio Farias, Vicente, Marcus Metri, Fernando Cartaxo, Mario Rolim e Ronaldo (in memorian) pela contribuição academiada pelas palavras de incentivo.

Aos funcionários da UFRPE, José Luiz (Lulinha), Júnior Granja, Sônia, Anacleto e Zezinho pelo apoio nos serviços prestados.

Ao Sr. Djalma e Vivaldo produtores da Fazenda Nossa Senhora do Rosário que acompanharam minhas atividades de campo trocando experiências e sempre prontos para me ajudar.

Aos meus amigos, Regia, Toinha, Heleno Martins, Juninho, Marcelo, Andeia, Marcus, Luciana, Liciane, Fabiane, Priscila, Denis.

A Fundação de Apoio a Ciência e Tecnologia de Pernambuco pela concessão da bolsa.

Ao CNPq/CT-Hidro pelo suporte financeiro aplicado neste trabalho.

A todos que contribuíram de forma direta e indireta...

BIOGRAFIA

MANOEL LEAL COSTA NETTO, filho de Claudio Manoel Dantas Costa e Ivoneide Maria Silva Costa, nasceu em 08 de novembro de 1975, em Paulo Afonso, Bahia.

Cursou o ensino fundamental e médio no colégio Paulo Afonso na cidade de Paulo Afonso – BA.

Em 1998 iniciou o curso de Engenharia Agrônômica na Universidade Federal Rural de Pernambuco – PE, graduando-se 2003.

Em março de 2005 iniciou especialização em Gestão Ambiental pela Universidade Federal Rural de Pernambuco concluindo em setembro de 2007.

Em março de 2006 iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal Rural de Pernambuco efetuando a defesa da dissertação em fevereiro de 2008.

Sumário

Lista de figuras	I
Lista de tabelas	II
Resumo	1
Abstract	2
1.0 Introdução	3
2.0 Revisão de Literatura	5
2.1 Revisão Geral	5
2.2 Variabilidade espacial	6
2.3 Geoestatística indicadora	8
2.4 Indução eletromagnética	8
2.5 Modelos de calibração do EM 38	11
2.6 Características físicas	15
3.0 Material e Métodos	19
3.1 Avaliação da salinidade por indução eletromagnética	21
3.2 Determinação da condutividade hidráulica	22
3.3 Medições laboratoriais	23
3.4 Regressão múltipla	25
3.5 Caracterização geoestatística	26
3.6 Validação cruzada	28
3.7 Geoestatística indicadora	28
4.0 Resultados e discussão	30
4.1 Estimativa de condutividade elétrica do solo a partir dos modelos da literatura	39
4.2 Desempenho das calibrações locais	43
4.3 Caracterização geoestatística	48
4.4 Análise geoestatística	52
4.5 Mapeamento das propriedades físicas	54
4.6 Mapeamento indicador da salinidade	57
5.0 Conclusões	66
6.0 Referencias	67

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINAS
Figura 01. Resposta relativa para o EM38 na posição vertical "v" e horizontal "h" em função da profundidade (z) GEONICS (1999).	10
Figura 02. Resposta cumulativa para o EM38.	11
Figura 3. Mapa de classificação de solos do vale aluvial da Fazenda Nossa Senhora Do Rosário, Pesqueira (Corrêa & Ribeiro, 2001).	20
Figura 04. Vista do Geonics EM38 no modo horizontal e alturas em (cm) que ele foi suspenso em relação ao nível do solo.	22
Figura 5. Diagrama triangular das classes texturais do solo (Lemos & Santos, 1996).	24
Figura 6. Modelo 0-0,3m para leitura horizontal proposto por Rhoades et al. (1980).	39
Figura 7. Modelo 0-0,3m para leitura vertical proposto por Rhoades et al. (1980).	39
Figura 8. Modelo 0-0,30m proposto por Rhoades et al. (1989).	40
Figura 9. Modelo 0,3-0,6m para leitura horizontal proposto por Rhoades et al. (1980).	40
Figura 10. Modelo 0,3-0,6m vertical proposto por Rhoades et al. (1980).	40
Figura 11. Modelo proposto por Rhoades et al. (1989).	41
Figura 12. Modelo 0,6-0,9m para leitura horizontal proposto por Rhoades et al. (1980).	41
Figura 13. Modelo 0,6-0,9m para leitura vertical proposto por Rhoades et al. (1980).	41
Figura 14. Modelo 0,6-0,9m proposto por Rhoades et al. (1989).	42
Figuras 15. Modelo 0,90-1,20m para leitura horizontal proposto por Rhoades et al. (1980).	42
Figuras 16. Modelo 0,90-1,20m para leitura vertical proposto por Rhoades et al. (1980).	42
Figura 17. Modelo proposto por Rhoades et al. (1999) para as profundidades de 0-0,30m; 0,30-0,60m.	43
Figura 18. Modelo proposto por Rhoades (1999) para as profundidades de 0-0,30m; 0,30-0,60m; 0,60-0,90m.	43

Figura 19. Desempenho de modelos locais de regressão múltipla, para estimativa da condutividade elétrica real da camada 0-0,3 m, utilizando 9 pontos e 15 pontos, através de correlação linear.	46
Figura 20. Desempenho de modelos locais de regressão múltipla, para estimativa da condutividade elétrica real da camada 0,30-0,60 m, utilizando 9 pontos e 15, através de correlação linear.	46
Figura 21- Evolução do coeficiente de determinação r^2 da regressão múltipla, em função do número de níveis do EM38 acima da superfície do solo, para a camada 0-0,3 m.	47
Figura 22- Evolução do coeficiente de determinação da regressão múltipla, em função do número de níveis do EM38 acima da superfície do solo, para a camada 0,3-0,6 m	48
Figura 23. Análise de normalidade de condutividade elétrica real estimada, na camada 0-0,30m, na área 1.	49
Figura 24. Análise de normalidade da condutividade elétrica real estimada, na camada de 0,30-0,60m na área 1.	49
Figura 25. BOX-PLOT da condutividade elétrica real estimada, na camada 0-0,30m, na área 1.	50
Figura 26. BOX-PLOT da condutividade elétrica real estimada, na camada 0,30-0,60m, na área 1.	50
Figura 27. Teste de normalidade Kolmogorov- Smirnov do logaritmo da condutividade elétrica real, na camada 0-0,30m.	51
Figura 28. Teste da normalidade Kolmogorov- Smirnov do logaritmo da condutividade elétrica real, na camada 0,3-0,6m.	51
Figura 29. BOX-PLOT do logaritmo da condutividade elétrica real, na camada 0-0,30m na área 1	52
Figura 30. BOX-PLOT do logaritmo da condutividade elétrica real estimada, na camada 0,30-0,60m na área 1.	52
Figura 31 a e b. Semivariograma (a) e mapa de krigagem do logaritmo da condutividade elétrica estimada (b), na profundidade de 0-0,3m.	53
Figura 32 a e b. Semivariograma (a) e mapa de krigagem do logaritmo da condutividade elétrica estimada (b) na profundidade de 0,30-0,60m.	53
Figura 33 a e b. Semivariograma (a) e mapa de krigagem de areia (b), na profundidade de 0-0,20m, através de modelo gaussiano.	54
Figura 34 a e b. Semivariograma (a) e mapa de krigagem de silte (b), na profundidade de 0-0,20m, através de modelo gaussiano.	55

Figura 35 a e b. Semivariograma (a) e mapa de krigagem de argila na profundidade (b) de 0-0,20m, através de modelo esférico.	55
Figura 36 a e b. Semivariograma (a) e mapa de krigagem de areia (b) na profundidade de 0-0,40m, através de modelo gaussiano.	56
Figura 37. Semivariograma e mapa de Krigagem de silte em % , na profundidade de 0,20-0,40m, modelo gaussiano.	56
Figura 38 a e b. Semivariograma (a) e mapa de krigagem de argila (b), na profundidade de 0,20-0,40m, através de modelo gaussiano.	57
Figura 39. Semivariograma para atributo o condutividade elétrica real estimada na camada de 0,30-0,60m para o modelo esférico.	58
Figura 40. Semivariograma para o atributo condutividade elétrica real estimada na camada de 0,60-0,90m, para o modelo esférico.	58
Figura 41 a e b. Semivariograma (a) e mapa de isolinhas (b) para o atributo CEr, na	60
Figura 42. Semivariograma (a) e mapa de isolinhas (b) para o atributo CEr na camada de 0,3-0,6m no modelo gaussiano.	60
Figura 43 a e b. Semivariograma esférico indicador (a) e mapa associado, para as classes de solo (b) na profundidade de 0-0,20m.	62
Figura 44 a e b. Semivariograma exponencial indicador (a) e mapa associado, para a classe e solo (b) na profundidade de 0-0,20m.	62
Figura 45 a e b. Semivariograma gaussiano indicador (a) e mapa associado, para as classes de solo (b) na profundidade 0-0,20m.	63
Figura 46 a e b. Semivariograma esférico indicador (a) e mapa associado, para as classes de solo (b) na profundidade de 0,20-0,40m.	63
Figura 47 a e b. Semivariograma gaussiano indicador (a) e mapa associado para as classes de solo (b) na profundidade 0,20-0,40m	64
Figura 48 a e b. Semivariograma exponencial indicador (a) e mapa associado para as classes de solo (b) na profundidade 0,20-0,40m.	64

LISTA DE TABELAS

PÁGINAS

Tabela 1. Conjunto de equações propostas por Rhoades et al. (1999), relacionando número de amostras, profundidade e medições com o EM38.	14
Tabela 2. Conjunto de equações propostas por Rhoades et al. (1989).	14
Tabela 3. Estatística descritiva das características físicas e hídricas para umidade, areia, silte, argila porosidade e AD (Água Disponível), coletadas em todo vale aluvial da Fazenda Rosário simultaneamente às leituras com o EM38.	30
Tabela 4. Estatística descritiva das análises químicas realizadas para CEr e pH em amostras coletadas na Fazenda Rosário no momento da leitura com EM38.	31
Tabela 5. Estatística descritiva da umidade do solo na área “área 1”, na Fazenda Rosário, no momento da leitura com EM38.	32
Tabela 6. Estatística descritiva da umidade do solo na área “área 2”, na Fazenda Rosário, no momento da leitura com EM38.	32
Tabela 7. Estatística descritiva umidade do solo realizado nos pontos “paralelos”, distribuídos na Fazenda Rosário, no momento da leitura com EM38.	32
Tabela 8. Estatística descritiva da textura do solo (areia%, silte%, argila%), na área 1, localizada na Fazenda Rosário	33
Tabela 9. Estatística descritiva da textura do solo (areia%, silte%, argila%) na área 2 localizada na Fazenda Rosário	34
Tabela 10. Estatística descritiva da textura do solo (areia%, silte%, argila%), em pontos nos paralelos localizados na Fazenda Rosário	34
Tabela 11. Estatística descritiva da porosidade, para a área 1, localizada na Fazenda Rosário	35
Tabela 12. Estatística descritiva da porosidade, para a área 2 localizada na Fazenda Rosário	35
Tabela 13. Estatística descritiva da porosidade em pontos nos paralelos, localizados na Fazenda Rosário	35
Tabela 14. Estatística descritiva de água disponível na área 1 localizada na Fazenda Rosário	36
Tabela 15. Estatística descritiva de água disponível na área 2 localizada na Fazenda Rosário	36
Tabela 16. Estatística descritiva de água disponível na em pontos nos paralelo, localizados na Fazenda Rosário	36

Tabela 17. Estatística descritiva da condutividade elétrica e do pH do extrato saturado na área 1	37
Tabela 18. Estatística descritiva da condutividade elétrica e do pH do extrato saturado, na área 2	37
Tabela 19. Estatística descritiva da condutividade elétrica e do pH do extrato saturado, das amostras coletadas nos paralelos	38
Tabela 20. Coeficientes obtidos através da calibração local com β calculados para N=9 e N=15, para a camada de 0-0,30m.	44
Tabela 21. Calibração local para as leituras de CEr com base em leituras do EM38 para a camada de 0-0,30m.	45
Tabela 22. Coeficientes obtidos através da calibração local com β calculados para N=9 e N=15, para a camada de 0,30-0,60m.	45
Tabela 23. Estatística descritiva das estimativas de condutividade elétrica real CEr na área 1.	48
Tabela 24. Estatística descritiva para o teste de Kolgomorov-Smirnov, para a condutividade elétrica real estimada.	49
Tabela 25. Estatística descritiva da CEr estimada, na área 1, com os dados logaritmados.	50
Tabela 26. Teste de aderência à normalidade, para as condutividades elétricas reais estimadas, com os dados logaritmados.	51
Tabela 27. Geoestatística dos dados logaritmados da condutividade elétrica estimada.	52
Tabela 28. Parâmetros da Geoestatística Indicativa: para CEr em dS/m para a camada de 0,30 – 0,60 m.	57
Tabela 29. Geoestatística indicadora: 0,30-0,60m	58
Tabela 30. Geoestatística dos dados da condutividade elétrica estimada, admitindo cut-off igual a 4 dS/m.	59
Tabela 31. Geoestatística dos dados de propriedades físicas	61

Avaliação da Salinidade do Solo Utilizando Sensor de Indução Eletromagnética e Geoestatística em Vale Aluvial no Agreste de Pernambuco

RESUMO

A água armazenada em áreas de os vales aluvionais surge como uma das principais alternativas para o suprimento e desenvolvimento da agricultura familiar. Entretanto, a qualidade dessas águas nem sempre é adequada, podendo acarretar a salinização dos solos irrigados. Dentre os métodos para a medição da salinidade dos solos, são importantes os métodos eletromagnéticos. No trabalho, foram efetuadas leituras com o aparelho de indução eletromagnética EM38, para a determinação da condutividade elétrica aparente (CE_a), posicionando-se o equipamento no modo vertical e horizontal. Além de posicionado na superfície do solo, o equipamento foi disposto a diferentes alturas acima da superfície, de modo a possibilitar uma devida calibração do mesmo na estimativa da condutividade elétrica real do solo (CE_r). Para isso, amostras de solo foram coletadas a diferentes profundidades do perfil, visando permitir avaliação de desempenho da metodologia. As leituras de condutividade aparente permitiram verificar as estimativas de salinidade com base em modelos de calibração apropriados disponíveis na literatura. Esses modelos, com base em regressões lineares múltiplas, foram desenvolvidos para as condições locais do vale aluvial localizado no município de Pesqueira em Pernambuco. Os resultados foram analisados através da estatística descritiva clássica, bem como através de metodologia geoestatística. O objetivo do estudo foi caracterizar a distribuição espacial da condutividade elétrica do solo em vale aluvial com agricultura familiar no semi-árido pernambucano. As análises estatísticas mostraram que os dados de CE_r se ajustaram a uma distribuição log-normal. Através da metodologia geoestatística foram construídos semi-variogramas experimentais, posteriormente ajustados a um modelo teórico. A geoestatística indicadora permitiu a identificação de áreas salinas, associando-as com as classes de solo. A CE_r apresentou dependência espacial na escala de lote nas camadas 0-0,30 e 0,30-0,60m com melhor ajuste obtido para o modelo gaussiano. Verificou-se que o EM38 representa uma ferramenta adequada no mapeamento da salinidade do solo, quando submetido a calibrações locais e em escala de lote (dezenas de metros), e de vale (centenas de metros) mesmo em áreas com heterogeneidades verticais relevantes.

Palavras Chave: Salinidade do solo, Indução eletromagnética, Salinização

Assessment of Soil Salinity Sensor Using the Electromagnetic Induction and Geoestatística in Alluvial Vale in Agreste of Pernambuco

ABSTRACT

The water stored in alluvial areas emerges as a main alternative for the supply and development of the small-scale agriculture, also known as communal. However, the water quality is not always appropriate, which may cause soil salinization in irrigated areas. Among the methods for measuring soil salinity, it can be highlighted the electromagnetic. In this work, readings were performed using an EM38 electromagnetic induction unit for the determination of the apparent electrical conductivity (ECap), placing it in the vertical and horizontal position. Addition to positioning on tem soil surface, equipment was willing held at different heights above the surface, in order to enable a proper calibration for the estimation of the actual soil electrical conductivity (ECa). For this, hence soil samples were collected at different depths profile, aiming to provide an performance assessment of the methodology. The readings of the apparent conductivity allowed to verify the salinity estimates based on regressions available in the literature. Additionally, multiple linear regressions were developed for local conditions of the alluvial valley. The results were analyzed by descriptive classic statistics, and through geostatistics. The objective of this study was to characterize the spatial distribution of soil electrical conductivity in alluvial valley with family communal farming in the semi-arid of Pernambuco state. Statistical analyses showed the ECa data can be adjusted to a normal distribution. Through geostatistics it was built experimental semivariograms, subsequently adjusted to a theoretical model. The ECa presented spatial dependence on a plot scale at depths of 0-0.30 and 0.30-0.60 m with best fit obtained for the gaussian model. It was found that the EM38 is a suitable tool in mapping soil salinity, when subjected to local calibrations, and in a plot scale (tens of meters), and a valley one (hundreds of meters), even in areas with relevant vertical heterogeneities.

Key words: Salinity of the soil, Electromagnetic induction, Salinization

1.0 INTRODUÇÃO

O semi-árido do nordeste brasileiro apresenta cenários de secas frequentes, distribuição irregular de chuvas e pobreza rural. Todos esses aspectos contribuem para migração em massa da região. Índices anuais típicos de precipitação estão em torno de 500 mm, com cerca de 80% dessa precipitação ocorrendo durante a estação úmida, entre abril e julho. As frequentes secas, notadamente em anos de El Niño, limitam a expansão da atividade rural, contribuindo para a pobreza na região.

Nesse cenário, a agricultura familiar vem se constituindo importante fonte de renda em pequenas comunidades carentes e contribuindo para diminuir o êxodo rural. Diversas culturas de subsistência vêm sendo implantadas. No entanto, dada às condições climáticas adversas, com concentração da precipitação em um período curto do ano, a prática da irrigação torna-se imperiosa para o desenvolvimento da agricultura. Com escassos recursos hídricos de superfície, e mais susceptíveis às variações climáticas, os recursos hídricos subterrâneos vêm sendo mais utilizados mesmo apresentando muitas vezes qualidade inferior (Costa et al., 2003; Silva, 2000).

A irrigação comum nas áreas de aluvião pode apresentar impactos ambientais quanto ao solo e à água subterrânea (Ghassemi et al., 1991). Para reduzir estes impactos é necessário avaliar a lâmina de água aplicada, bem como se esta aplicação está compatível com a capacidade de infiltração do solo e a lâmina de lavagem do mesmo, visto que nos solos de textura fina, o processo de salinização tem um maior destaque devido à reduzida capacidade de infiltração (Ritjema, 1969; van Hoorn & van Alphen, 1994; Ribeiro et al., 2003).

Segundo Nadler & Frenkel (1980), o solo pode conduzir corrente elétrica através da água intersticial que contém eletrólitos dissolvidos e através dos cátions trocáveis que estão localizados próximos da superfície das partículas de solo carregadas, e são eletricamente móveis em vários níveis. Tal comportamento é de importância em particular quando se utilizam métodos eletromagnéticos na avaliação da salinidade do solo. A salinidade do solo não ocorre de modo homogêneo, observando-se variabilidades relevantes que podem comprometer a produção agrícola.

Ribeiro Junior (1995) destaca que a geoestatística permite que cada observação possa ser descrita não apenas pelo seu valor, mas também por informações de sua posição, expressas em um sistema de coordenadas. Assim, observações geográficas mais próximas tendem a apresentar valores mais similares que os pontos mais afastados entre si.

Um elevado número de trabalhos vem contribuindo para o desenvolvimento da geoestatística. Esta ferramenta propicia análise de dados em vários ramos da ciência, inclusive na agricultura, levando em consideração a distância de separação entre as amostras. Isto se faz necessário, uma vez que, para determinadas variáveis, a hipótese de independência entre as amostras, assumida pela estatística clássica, não é observada (Gonçalves et al., 2004).

O estudo da variabilidade espaço-temporal de propriedades físico-hídricas do solo, bem como da salinidade, tem trazido relevantes avanços para a agricultura de precisão, revelando-se uma importante metodologia de análise experimental (Rocha et al., 2004).

Coelho Filho et al. (2001) explicam que, com um modelo de dependência espacial de variáveis do solo, a geoestatística possibilita a estimativa em pontos não amostrados, viabilizando o mapeamento da variável através da krigagem. Este procedimento pode auxiliar na melhor distribuição das parcelas e dos blocos experimentais no campo, assim como no manejo racional da água, de fertilizantes e de defensivos agrícolas. Estes mesmos autores, trabalhando com variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, como granulometria, densidade do solo e água disponível, afirmam que o mapeamento das variáveis permite o estabelecimento de subáreas mais homogêneas, nas quais se pode realizar, de maneira mais eficiente, o manejo local de água e do solo.

O objetivo principal desta pesquisa é investigar a subsuperfície através do emprego do método eletromagnético indutivo EM 38 visando caracterizar a salinidade do solo irrigado do vale aluvial da Fazenda Nossa Senhora do Rosário.

Desta forma, os objetivos podem ser divididos em:

Caracterizar as heterogeneidades e a distribuição espacial da condutividade elétrica do solo, de modo a identificar regiões em situação crítica; verificar se a distribuição espacial da salinidade do solo está associada com a variabilidade de parâmetros físico-hídricos tais como textura.

2.0 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Revisão Geral

Embora os vales aluviais, em geral, apresentem restrita capacidade de armazenamento, devido às suas reduzidas dimensões, são explorados intensamente para pequena agricultura irrigada (Monteiro, 2007).

A salinização é um dos problemas de grande importância para agricultura em regiões semi-áridas e áridas, podendo ser causada por sais dissolvidos na água de irrigação (Horney et al., 2005). Constitui-se em um grave problema nas áreas irrigadas, principalmente quando sua intensidade interfere no desenvolvimento das culturas, reduzindo a produtividade das plantas em níveis anti-econômicos (Oliveira & Sarvasi, 1997).

O excesso de sais prejudica o crescimento das plantas bem como sua produtividade, devido aos efeitos diretos sobre o potencial osmótico e dos íons potencialmente tóxicos presentes em elevadas concentrações na solução do solo (Freire et al., 2003).

Esse problema é mais freqüente em regiões semi-áridas e áridas, caracterizadas por elevadas taxas de evapotranspiração e baixos índices pluviométricos (Souza et al., 2000).

O acúmulo de sais no solo depende da qualidade da água de irrigação, das propriedades físicas do solo e, sobretudo, das condições de drenagem e do balanço de água e de sais no subsolo (Dias et al., 2005).

Souza et al. (2000), trabalhando com variabilidade espacial da salinidade de um solo aluvial, especificamente com as variáveis pH da pasta de saturação do solo, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) e percentagem de sódio trocável (PST), nas camadas de 0-20 cm; 20-40 cm e 40-60 cm, verificaram que através de métodos geoestatísticos foi possível a identificação de correlação espacial, bem como a confecção de mapas de isolinhas obtidos da combinação das CEes e PST. Constataram que os problemas de salinidade e sodicidade aumentavam com a profundidade. Ainda se tratando de trabalhos relacionados com propriedades químicas do solo, Silva & Chaves (2001), estudando a variabilidade de um Alissolo, com respeito aos teores de fósforo, potássio e matéria orgânica do solo em duas camadas 0-0,3 e 0,3-0,6 m, verificaram que as variáveis químicas estudadas apresentaram forte correlação espacial.

2.2 Variabilidade espacial

O estudo da dependência espacial de propriedades do solo através da teoria das variáveis regionalizadas ou geoestatísticas permite a interpretação e a projeção dos resultados com base na estrutura de sua variabilidade natural. Esta interpretação da variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo vem sendo vastamente explorada por várias pesquisas. As variações no solo são decorrentes das variações nas quais atuaram os processos de sua formação e das diversas atuações do homem durante seu cultivo (Cichota et al., 2003; Reichardt & Timm, 2004).

Goovaerts (1994) considera que no estudo de áreas onde há um gradiente de propriedades do solo têm sido desenvolvidas e aplicadas técnicas amostrais e de análise de dados que levem em consideração a variação espacial, que muitas vezes está associada a sua formação.

Naturalmente, ocorre uma maior variação do solo à medida que os pontos amostrais ficam mais distantes uns dos outros. Por outro lado, segundo Vieira (2000), os solos podem apresentar diferenças marcantes em suas propriedades físico-químicas até mesmo em curtas distâncias, tanto vertical como horizontalmente.

Cressie (1991) considera de grande importância uma abordagem que leve em consideração a dependência espacial, mostrando os efeitos de autocorrelação espacial em problemas de estimação, predição e delineamento de experimentos. Os autores Pessoa (2006), Jabro et al. (2006), Mello et al. (2006), Montenegro & Montenegro (2006) e Souza (2007) desenvolveram relevantes trabalhos relacionados à variabilidade espacial de propriedades físico-químicas do solo.

Diversos atributos físicos do solo podem apresentar estrutura de variabilidade espacial. Essa variabilidade pode-se apresentar em diferentes graus em áreas de aluvião, dada as condições nas quais esses solos são formados (Eguchi et al., 2002; Telles, 1988). Isto dificulta o manejo de solo e água, o que ressalta a necessidade de pesquisas que permitam melhor avaliação da variabilidade espacial presente (Souza et al., 2000).

Ribeiro Junior (1995) ressalta que na geoestatística, cada observação é descrita não apenas pelo seu valor local, mas também por informações de sua posição.

Souza (2007), em área de um Neossolo Flúvico na Fazenda Nossa Senhora do Rosário, utilizou a geoestatística para verificar a evolução da condutividade elétrica em solo irrigado com água moderadamente salina, bem como a dependência espacial dessa variável, identificando as áreas afetadas pela salinização. Lund et al. (2001) constataram que a

condutividade elétrica aparente do solo se correlaciona com a textura e com o tamanho das partículas do solo.

Segundo Gonçalves (1997), uma vez quantificada a dependência espacial das propriedades do solo, esta pode ser utilizada para a classificação e para o levantamento, assim como pode ser usada na interpolação entre observações, permitindo o mapeamento da propriedade do solo dentro da área, por meio da krigagem. A krigagem permite a estimativa de valores de forma não tendenciosa e com variância mínima Gonçalves, 1997, estimando propriedades físicas do solo, como a variável de interesse em um local onde não foi determinada, utilizando para isso dados obtidos em pontos adjacentes (Wackernagel, 1998).

Voltz et al. (1997) verificaram variações de propriedades do solo em escala regional, comparando a ponderação por krigagem, com o método baseado na distância quadrática e o método dos polígonos de influência. Estes dois últimos métodos, segundo concluíram, devem ser usados quando a dependência espacial da variável é fraca.

Aos semivariogramas experimentais que apresentaram estrutura de dependência espacial foram ajustados modelos teóricos. Os mais usuais são o esférico, gaussiano e exponencial. Nos modelos seguintes, C_0 é o efeito pepita, $C_0 + C_1$ é o patamar e “a” é o alcance do semivariograma. O valor de C_0 revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias inferiores à menor distância entre as amostras. Parte dessa descontinuidade pode ser também devida a erros de medição. À medida que h aumenta, $\gamma(h)$ também aumenta até um valor máximo no qual se estabiliza. Esse valor no qual $\gamma(h)$ se estabiliza chama-se patamar (“sill”), e é aproximadamente igual à variância dos dados, $\text{Var}(z)$. A distância na qual $\gamma(h)$ atinge o patamar é chamada de alcance (“range”) representado por “a”, e é a distância limite da dependência espacial. Medições localizadas a distâncias maiores que “a” têm distribuição espacial aleatória e por isto são independentes entre si. Para essas amostras, a estatística clássica pode ser aplicada sem restrições. Por outro lado, amostras separadas por distâncias menores que “a” são correlacionadas umas às outras. Dessa maneira, o alcance “a” é a linha divisória para a aplicação da geoestatística e da estatística clássica (Vieira, 2000).

2.3 Geoestatística indicadora

A geoestatística indicadora vem sendo aplicada em geologia e em hidrologia, principalmente na avaliação de semi-variogramas experimentais a partir de perfis de sondagem (Johnson & Dreiss, 1987; Johnson, 1995). Esta metodologia visa diferenciar regiões contrastantes estabelecendo um cut-off (nível de corte) como ponto de separação dos parâmetros. Johnson (1995) destaca que é possível a aproximação indicadora considerar as características estruturais em escalas relevantes para investigação de processos de contaminação e manejo dos solos. Em estudos em vale aluvial Montenegro & Montenegro (2006) verificaram que a geoestatística indicadora preservou a correlação espacial entre a textura do solo e a condutividade hidráulica, e entre a textura do solo e a condutividade elétrica.

2.4 Indução eletromagnética

Para a avaliação da condutividade elétrica do solo, a indução eletromagnética surge como uma importante alternativa, pois é uma técnica não invasiva que pode ser utilizada para avaliar o perfil de condutividade elétrica aparente do solo CEa, de acordo com a profundidade, por meio de leituras múltiplas, obtidas com o instrumento disposto a alturas variadas sobre a superfície do solo, segundo Rhoades & Corwin (1981) e Rhoades & Corwin (1990).

Kachanoski et al. (1990) verificaram que a CEa explicava 96% da variação espacial no conteúdo de água no horizonte superior (0 – 0,5 m) do perfil, de um campo de 1,8 hectares. Por outro lado, estudos realizados por Dolittle et al. (1994) e Sudduth et al. (1995) mostraram que a profundidade de uma camada de solo superficial sobreposta a uma camada de argila pode ser calculada precisamente com leituras efetuadas numa única altura com sensor de indução eletromagnética EM 38 Geonics (1999), eliminando assim, a necessidade de efetuar medidas a alturas múltiplas.

Rhoades & Corwin (1981), Lesch et al. (1992), Hopking e Richardson (1999), Rhoades et al. (2000), Triantafilis et al. (2002), Blackburn (2002) e Pessoa (2006) apresentam o EM38 como uma ferramenta eficiente para identificar as propriedades do solo. O EM38 é baseado na propagação de campos eletromagnéticos de baixa frequência, inferior a 1 MHz, envolvendo os fenômenos físicos de eletricidade e magnetismo. Triantafilis et al. (2000) 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.

Lyle (2007), em trabalho realizado com EM38 na Fazenda Nossa Senhora do Rosário localizada em Pesqueira Pernambuco, verificou que o aparelho é uma ferramenta adequada no monitoramento da salinidade, podendo ser utilizada em vários locais mesmo com variações texturais, desde que calibrado em regiões de baixa salinidade. Blackburn (2002), na mesma fazenda, caracterizou a dependência espacial da salinidade do solo quando analisou dados de condutividade elétrica aparente (CEa).

Variações existentes em subsuperfície podem ser detectadas pelo EM38, pois a soma das correntes individuais, em função da profundidade, gera a resposta do instrumento, permitindo assim a determinação de um elevado número de dados, visto que a corrente gerada é equivalente à condutividade de cada camada do solo (Geonics, 1999). McKenzie et al. (1997) ressaltam a possibilidade de se obter um elevado número de medidas de campo com o EM38. Este instrumento tem uma profundidade efetiva de 1,5 metros, e possui compensação automática de temperatura, podendo medir condutividades entre 0,5 e 1000 dS/m. É uma importante ferramenta na preparação de mapas de salinidade do solo, possibilitando inventários de salinização (Rhoades & Corwin, 1981).

A comparação entre parâmetros de áreas diferentes ou de uma mesma área de exploração agrícola tem sido a preocupação de diversos pesquisadores pela sua utilidade na interpretação de conjuntos que estejam inter-relacionados (Montgomery & Peck, 1992).

McNeill (1980) enfatiza que a resposta obtida pelo equipamento de indução eletromagnética sofre contribuições de diferentes profundidades. A CEa lida no aparelho é a integral da multiplicação da resposta relativa $\sigma(z)$ pela CE(z), como se segue:

$$CEa = \int_0^{\infty} \sigma(z).CE(z).dz \quad [1]$$

Em que: CE(z) é a função da CE ao longo da profundidade 'z', e $\sigma(z)$ é a função de ponderação para o instrumento. A integral da resposta relativa de 0 a infinito é igual a 1, ou seja:

$$\int_0^{\infty} \sigma(z).dz = 1 \quad [2]$$

A curva de resposta relativa ilustrada na Figura 1 demonstra que a maior contribuição para a leitura está na camada situada a 0,4 vezes o espaçamento entre bobinas, para o modo vertical $\sigma_v(z)$, e de 0 para o modo horizontal $\sigma_h(z)$. No EM38, o espaçamento entre as bobinas é de 1,0 m.

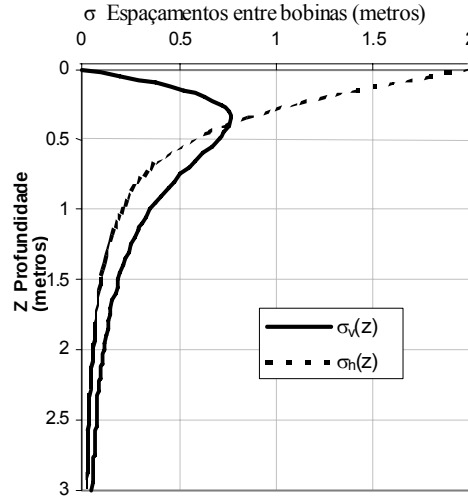


Figura 01. Resposta relativa para o EM38 na posição vertical "v" e horizontal "h" em função da profundidade (z) GEONICS (1999).

Das funções anteriormente descritas, derivam as funções de resposta cumulativa $R_v(z/s)$ e $R_h(z/s)$, que representam a resposta fracional obtida de todo material situado abaixo da profundidade z , para o modo vertical e para o modo horizontal de leitura, respectivamente. A função de resposta cumulativa é definida como a contribuição relativa do campo eletromagnético secundário abaixo da profundidade z , e é dada por:

$$R_v(z/s) = \int_{z/s}^{\infty} \sigma_v(z).dz \quad [3]$$

$$R_h(z/s) = \int_{z/s}^{\infty} \sigma_h(z).dz \quad [4]$$

Estas funções estão graficamente representadas na Figura 2.

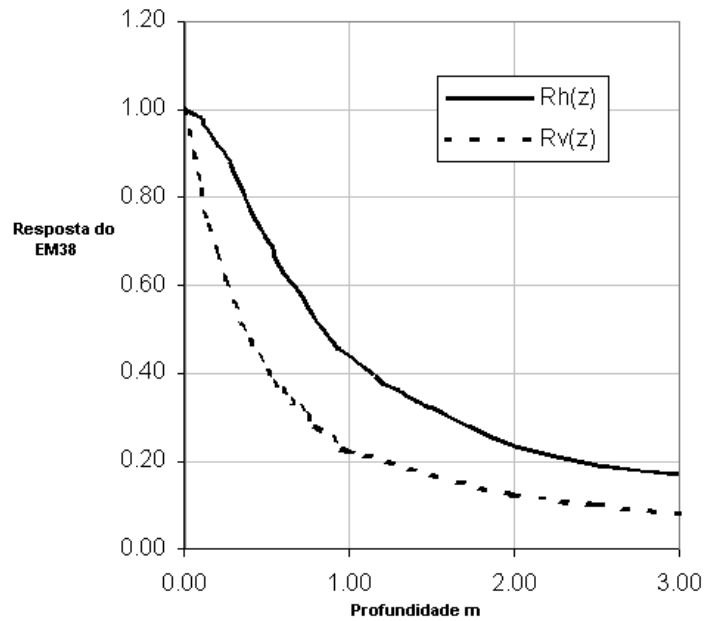


Figura 02. Resposta cumulativa para o EM38.

Considerando que o solo possui camadas horizontais com condutividades $CE_1, CE_2, \dots, CE_n$, com limites inferiores de $z_2, \dots, z_n$, pode-se escrever:

$$CEa = CE_1[1-R(z_1)] + CE_2.[R(z_1)] - R(z_2)] + \dots + CE_n. [R(z_{n-1})-R(z_n)] + CE(z_{n-\infty}). R(z_n) \quad [5]$$

À medida que z aumenta, $R(z)$ tende para zero, diminuindo a sensibilidade do equipamento em captar respostas oriundas destes materiais. Realizando-se leituras no modo vertical e horizontal em diversas alturas, pode-se chegar a um sistema de equações que permite avaliar o perfil de condutividade elétrica aparente (CEa).

Conforme já discutido, a condutividade elétrica aparente do solo (CEa) é função de diversos parâmetros que interferem no fluxo de elétrons em meios porosos, tais como estrutura, umidade, teor de argila, tipo de argila e, sobretudo, o teor de sais contido neste meio condutor (McNeill, 1980; GEONICS, 1999).

No equipamento EM38, as leituras são obtidas a partir da indução de pequenos “redemoinhos” de correntes elétricas e leitura do campo magnético que estas correntes geram. Uma pequena bobina transmissora colocada na extremidade do EM38 é usada para gerar um campo magnético primário oscilante que induz correntes em movimentos circulares no solo. Tal indução é feita através da combinação de uma corrente alternada com uma frequência de áudio (McNeill, 1980; GEONICS, 1999). Uma pequena bobina receptora, colocada na extremidade dianteira mede o campo magnético primário e secundário, sendo o segundo

muito menor que o primeiro. A principal tarefa da bobina receptora é a de medir o pequeno sinal que ascende das correntes induzidas na presença de um sinal muito maior oriundo do campo magnético primário. Para tanto, faz-se necessário “zerar” o instrumento antes que se comece o levantamento. O medidor de condutividade elétrica EM38 opera com a frequência de 13200 Hz (Geonics, 1999).

2.5 Modelos de calibração do EM 38

Rhoades et al. (1981) realizaram estudos para calibração do EM38 em condições locais. Para tal, leituras a diferentes alturas a partir do nível do solo foram efetuadas. Com base em estimativas da condutividade elétrica real (CE_r), foram desenvolvidos coeficientes de regressão múltipla. As equações desenvolvidas por Rhoades et al. (1980) para relacionar a condutividade aparente EM com as condutividades elétricas reais (CE_r) são:

$$EM_0 = 0,4418 EC_1 + 0,2049 EC_2 + 0,1045 EC_3 + 0,0604 EC_4 + 0,1940 EC_5 - 0,0005 \quad [6]$$

$$EM_1 = 0,0829 EC_1 + 0,2526 EC_2 - 0,0507 EC_3 + 0,0736 EC_4 + 0,1658 EC_5 + 0,0143 \quad [7]$$

$$EM_2 = 0,6662 EC_1 - 0,0231 EC_2 - 0,0412 EC_3 + 0,0307 EC_4 + 0,0324 EC_5 + 0,1188 \quad [8]$$

$$EM_3 = 0,5512 EC_1 - 0,0479 EC_2 + 0,0339 EC_3 + 0,0195 EC_4 + 0,0122 EC_5 + 0,1181 \quad [9]$$

$$EM_4 = 0,4352 EC_1 - 0,0468 EC_2 + 0,0287 EC_3 + 0,0093 EC_4 + 0,0073 EC_5 + 0,0961 \quad [10]$$

Onde os índices 0 - 4 e 1 - 5 se referem a níveis acima da superfície do solo, e profundidade de medição, respectivamente.

Segundo Rhoades et al. (1981), apesar da praticidade do método, este necessita de calibrações que devem ser estabelecidas para as diferentes áreas, e justificam tendo em vista a variação do tipo de solo e de materiais presentes na composição do mesmo. Os mesmos autores desenvolveram um conjunto de equações para outra localidade nos Estados Unidos, invertendo o sistema matricial acima, de modo a explicitar o cálculo das condutividades. As regressões propostas foram:

$$EC_{0-0.3} = -0,1285 EM_0 + 0,1446 EM_1 + 5,3878 EM_2 - 17,4476 EM_3 + 15,0549 EM_4 - 0,1309 \quad [11]$$

$$EC_{0.3-0.6} = -1,3259 EM_0 - 4,8938 EM_1 + 55,8250 EM_2 - 94,0405 EM_3 + 47,4196 EM_4 - 0,9169 \quad [12]$$

$$EC_{0.6-0.9} = 9,1705 EM_0 - 8,4116 EM_1 - 18,3090 EM_2 + 50,6298 EM_3 - 42,5033 EM_4 - 0,1224 \quad [13]$$

$$EC_{0.9-1.2} = 1,1090 EM_0 + 0,2352 EM_1 - 23,3536 EM_2 + 221,0100 EM_3 - 266,8789 EM_4 + 3,5012 \quad [14]$$

Onde os índices 0, 1, 2, 3 e 4 se referem às alturas (0, 0,30, 0,60, 0,90, 1,20m) acima da superfície do solo. Além das regressões acima, vários autores desenvolveram equações para a calibração do EM 38 (Rhoades et al. (1999), Heath et al.(1999), Johnston et al.(1997) Johnston (1994)). Rhoades e Corwin (1981), Lesh et al. (1992) e Corwin e Rhoades (1982) propuseram metodologias para a estimativa da CEa através de leituras de EM_h e EM_v para

intervalos de 0,3 m até 0,9 m de profundidade. Rhoades et al. (1989) também estimaram leituras aparentes de EM_h e EM_v , para intervalos de 0,3 m até 0,9 m de profundidade, incluindo transformações co-linearidade entre EM_v e EM_h , utilizando as desigualdades $EM_h > EM_v$ e $EM_h \leq EM_v$, para distinguir os grupos de tipo de perfil. Rhoades (1992) estimaram a CEa a partir de EM_h e EM_v , para intervalos sucessivos de 0,3 m, até 0,9 m de profundidade, com correção de co-linearidade entre EM_h e EM_v . Slavich (1990) utilizou a média dos intervalos 0-0,30, 0-0,60 e 0-0,90m e desenvolveu seis regressões múltiplas lineares considerando o EM38, tanto no modo horizontal quanto no vertical. Wollenhaupt (1986) propôs duas equações utilizando a resposta ponderada aparente diretamente a partir de leituras de EM_h e EM_v , utilizando intervalos de 0,3 m de profundidade, chegando até 1,8 m para leituras verticais, e até 1,2 m de leituras horizontais. McKenzie et al. (1989) desenvolveram um sistema de equação baseado em um conjunto de 8 equações de regressão linear, com leituras do EM38. Os autores utilizaram a resposta ponderada de EM_h e EM_v , agrupando a textura do solo em três classes (grossa, média e fina).

Rhoades et al. (1999) desenvolveram relações lineares entre $\ln(EM_h)$ e a diferença entre $(\ln EM_h - \ln EM_v)$. Para perfis uniformes de CEa foi desenvolvida a seguinte relação:

$$\ln(EM_h) - \ln(EM_v) = 0,04334 + 0,03058 \ln(EM_h) + 0,00836 EM_h^2 \quad [15]$$

Rhoades et al. (1999) estabeleceram três critérios, quando o perfil do solo não apresenta uniformidade:

1) Perfil regular, quando a medida $(\ln EM_h - \ln EM_v) < 5\%$ do $(EM_h - \ln EM_v)$ teórico (eq.15);

2) Perfil uniforme, quando a medida $(\ln EM_h - \ln EM_v)$ está dentro $+ - 5\%$ do valor teórico $(\ln EM_h - \ln EM_v)$ (eq. 15);

3) Perfil invertido, quando a medida $(\ln EM_h - \ln EM_v) > 5\%$ do valor teórico $(\ln EM_h - \ln EM_v)$ (eq. 15);

Rhoades et al. (1999) propuseram modelos matemáticos relacionando o tipo de perfil e o logaritmo natural das condutividades elétricas aparentes, atenuando efeitos de valores discrepantes, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Conjunto de equações propostas por Rhoades et al. (1999), relacionando número de amostras, profundidade e medições com o EM38

Profundidade (m)	Equação preditiva	n	R ²
Para perfis regulares (valores medidos <5% do valor teórico)			
0-0,30	$\ln EC_a = 0,414 + 0,985 \ln EM_H + 2,336 (\ln EM_H - \ln EM_V)$	650	0,76
0,30-0,60	$\ln EC_a = 0,836 + 1,262 \ln EM_H + 1,307 (\ln EM_H - \ln EM_V)$	625	0,75
0,60-0,90	$\ln EC_a = 0,674 + 1,089 \ln EM_H - 0,446 (\ln EM_H - \ln EM_V)$	200	0,69
Para perfis uniformes (valores medidos dentro de 5% do valor teórico)			
0-0,30	$\ln EC_a = 0,478 + 1,209 \ln EM_H + 0,411 (\ln EM_H - \ln EM_V)$	73	0,81
0,30-0,60	$\ln EC_a = 0,699 + 1,234 \ln EM_H - 0,623 (\ln EM_H - \ln EM_V)$	70	0,81
0,60-0,90	$\ln EC_a = 0,477 + 1,053 \ln EM_H - 0,691 (\ln EM_H - \ln EM_V)$	24	0,81
Para perfis invertidos (valores medidos > 5% do valor teórico)			
0-30	$\ln EC_a = 0,626 + 1,239 \ln EM_H + 0,325 (\ln EM_H - \ln EM_V)$	56	0,91
30-60	$\ln EC_a = 0,881 + 1,216 \ln EM_H + 1,318 (\ln EM_H - \ln EM_V)$	55	0,81
60-90	$\ln EC_a = 0,563 + 1,206 \ln EM_H + 1,641 (\ln EM_H - \ln EM_V)$	21	0,91

Rhoades et al. (1989) propuseram um conjunto de equações estabelecendo como variáveis independentes as leituras do EM38 no modo vertical e horizontal, com base em uma transformação de potência 0,25, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Conjunto de equações propostas por Rhoades et al. (1989)

Profundidade em m	Equação para condutividade elétrica	n	R ²
Para $EM_h \leq EM_v$			
0-0,30	$EC_a^{0,25} = 2,539.EM_h^{0,25} - 1,413.EM_v^{0,25} - 0,068$	759	0,810
0-0,60	$EC_a^{0,25} = 2,092.EM_h^{0,25} - 0,81.EM_v^{0,25} - 0,179$	761	0,895
0,30-0,60	$EC_a^{0,25} = 1,894.EM_h^{0,25} - 0,407.EM_v^{0,25} - 0,292$	758	0,840
Para $EM_h \geq EM_v$			
0-0,30	$EC_a^{0,25} = 1,164.EM_h^{0,25} - 0,078.EM_v^{0,25}$	165	0,922
0-0,60	$EC_a^{0,25} = 0,640.EM_h^{0,25} + 0,568.EM_v^{0,25} - 0,114$	163	0,969
0,30-0,60	$EC_a^{0,25} = 1,367.EM_v - 0,209$	162	0,919

O EM38, de acordo com McNeill (1980), possui altura de influência na posição vertical de aproximadamente 1,5 m, enquanto que na posição horizontal chega a 0,75m. Com isso, as leituras de condutividade elétrica em diferentes alturas acima do solo sofre influência de mudanças na salinidade com a profundidade.

2.6 Características físicas

Os processos de infiltração, circulação e recarga são de grande relevância para a manutenção do equilíbrio salino em um aquífero, segundo Leprun (1993), apud Ribeiro et al. (2003). Para tanto, é indispensável uma adequada caracterização das propriedades hídricas do solo, dentre as quais pode-se citar a condutividade hidráulica. Esta é um dos principais parâmetros utilizados para estudos agrícolas e ambientais que envolvem o fluxo de água no solo, tais como planejamento de sistemas de irrigação e drenagem, rebaixamento do lençol freático, movimento de água no solo, nutrição de plantas, controle da erosão e poluição da água (Jones & Wabernet, 1984; Freeze, 1994; Filizola et al.(1997), Queiroz et al.(1997), Jong van Lier & Libardi, (1999); Libardi, (2000); Radcliffe & Rasmussen (2000), apud por Bastos (2004).

Dos vários atributos físicos, aqueles que se relacionam com a dinâmica da água no solo, como a condutividade e a taxa de infiltração, exibem uma alta variabilidade espacial (Warrick & Nielsen, 1980).

Libardi (2000) ressalta que há carência de estudos sobre a dinâmica da água em condições não-saturadas. Para avaliação de tais fluxos, as propriedades hidráulicas da zona não-saturada precisam ser estimadas. Dentre os métodos de campo mais utilizados para medir as propriedades hidráulicas não-saturadas, destaca-se o permeâmetro de Guelph (Zhang et al.,1998).

O permeâmetro de Guelph é um dispositivo que permite o monitoramento da taxa de infiltração a partir de uma queda do nível d'água dentro de um reservatório até que o equilíbrio seja atingido, onde a determinação dos valores de condutividade hidráulica saturada podem ser calculados segundo a metodologia de Reynolds & Elrick (1986) citados por Bastos (2004), que realizou testes de campo em área de aluvião.

Arzeno (1990), Sarvasi (1994) e Castro (1995), citados por Souza & Alves (2005), utilizando o permeâmetro de Guelph em diferentes sistemas de preparo de solo, determinaram valores de condutividade hidráulica nos sistemas de plantio direto, cultivo mínimo e plantio convencional. Os autores verificaram que a condutividade hidráulica do solo apresentou variações no plantio direto e convencional próximo à superfície.

O procedimento adotado para o Guelph é executado com pelo menos duas cargas hidráulicas dentro de um furo de sondagem. As taxas de fluxo Q_1 e Q_2 são obtidas através da multiplicação das taxas de fluxo medidas por um coeficiente correspondente à razão das áreas do reservatório e do furo de sondagem. Os valores de condutividade hidráulica saturada podem ser calculados segundo Reynolds & Elrick(1986).

O permeâmetro de Guelph consiste em um conjunto de tubos concêntricos. O tubo central tem a função de permitir a entrada de ar e regular o nível d'água dentro do furo de sondagem. Os demais tem a função de reservatório e suporte. Possui várias vantagens, dentre elas a fácil montagem em campo. O ensaio é realizado com pequeno volume de água, permitindo a estimativa da curva de condutividade hidráulica não saturada, e funciona mesmo com pequenos gradientes hidráulicos junto à parede do furo.

A vazão de testes para carga hidráulica constante foi descrita por Reynolds & Elrick (1986) como:

$$2\pi H^2 K_0 + C\pi a^2 K_0 + 2\pi H\phi_m = CQ \quad [16]$$

em que:

a - é o raio do furo;

ϕ_m - é o potencial de fluxo matricial;

H - é o nível da água no furo;

K_0 - é a condutividade hidráulica saturada de campo;

C - é um parâmetro de ajuste adimensional;

Q - é a vazão.

A utilização de duas cargas hidráulicas distintas forma um sistema de equações cujas incógnitas são K_0 e o ϕ_m .

O potencial de fluxo matricial ϕ_m é definido como:

$$\phi_m = \int_{\varphi_i}^0 K(\varphi) d\varphi \quad [17]$$

$$\varphi_i < \varphi < 0$$

e

$$K(\varphi) = K_0 \exp(\alpha\varphi) \quad [18]$$

em que

φ - é a pressão matricial no solo, e

α - é um parâmetro de porosidade do solo.

Substituindo-se a equação [10] (que é a função de condutividade hidráulica) na [11], obtém-se:

$$\frac{\varphi_m}{K_0} = \frac{(1 - \exp(\alpha\varphi))}{\alpha} \quad [19]$$

Como o numerador do segundo membro da eq. (4) tende para 1, tem-se:

$$\frac{\varphi_m}{K_0} = \alpha^{-1} \quad [20]$$

As equações seguintes permitem o cálculo da condutividade hidráulica e do fluxo de potencial mátrico, em testes com duas cargas hidráulicas.

Condutividade hidráulica:

$$K = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad [21]$$

em que

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad [22]$$

e onde, Q_1 e Q_2 são as vazões de testes correspondentes às cargas H_1 e H_2 respectivamente.

$$G_1 = G_2 \frac{[H_2 C_1]}{[H_1 C_2]} \quad [23]$$

com,

$$Q_2 = (X)(R_1)$$

Fluxo potencial matricial:

$$\phi_m = J_1 Q_1 - J_2 Q_2 \quad [24]$$

em que,

$$J_1 = \frac{(2H_2^2 + a^2 C_2) C_1}{2\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad [25]$$

com,

$$J_2 = J_1 \left[\frac{(2H_1^2 + a^2 C_1) C_2}{(2H_2^2 + a^2 C_2) C_1} \right] \quad [26]$$

A sorvidade (S) pode ser calculada diretamente como se segue:

$$S = \sqrt{2(\Delta\theta)\phi_m} \quad [27]$$

Em que: $\Delta\theta = \theta_{cc} - \theta_i$; θ_{cc} é a umidade volumétrica na capacidade de campo; θ_i é a umidade volumétrica inicial.

O teste de Guelph permite uma estimativa da curva de condutividade hidráulica não saturada, mesmo com pequenos gradientes hidráulicos junto à parede do furo.

O permeâmetro de Guelph, segundo Montenegro et al. (2004), possui uma maior adequação para investigação ao longo dos perfis do solo. Desse modo, optou-se por utilizar esta metodologia na pesquisa.

3.0 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido no Agreste Setentrional de Pernambuco, região de clima semi-árido, no município de Pesqueira, em áreas de assentamento rural do Estado de Pernambuco, e com agricultura tipicamente familiar. As atividades de campo foram realizadas no período de abril a julho de 2007. Do ponto de vista hidrológico, a área está localizada em uma bacia hidrográfica importante para o Estado de Pernambuco, a bacia do Rio Ipanema, situando-se em particular no vale aluvial do Mimoso.

Nesta bacia, os cultivos agrícolas se desenvolvem tanto nos vales ou planícies aluviais (com irrigação através de poços), quanto nas encostas ou zonas topograficamente elevadas, onde predomina o cultivo de sequeiro.

Tem-se conduzido o monitoramento sistemático nos poços e piezômetros instalados, e através destes, vem sendo verificada a condutividade elétrica e o nível do lençol freático na área em estudo, permitindo assim a análise da variabilidade espacial, incluindo aspectos sazonais. A qualidade da água subterrânea tem marcante influência na salinidade do solo no vale.

A salinidade é influenciada pela infiltração promovida pela precipitação. O tipo de solo produz diferenciações na salinidade, tanto no lençol subterrâneo quanto na zona não-saturada.

A Fazenda Nossa Senhora do Rosário está localizada às margens da Rodovia Luíz Gonzaga, no Km 220, nas coordenadas geográficas 08^o 24' 11'' de latitude Sul e 37^o 48' 54'' de longitude Oeste. A mesma se encontra sobre um aquífero aluvial que constitui a fonte de suprimento de água para o desenvolvimento da agricultura irrigada. A Fazenda está situada a uma altitude média de 630 m acima do nível do mar e possui área total de 606,24 ha (CISAGRO, 1991), com cerca de 110 ha localizados sobre aquífero aluvial. No vale aluvial em estudo, hortaliças como cenoura, beterraba, e repolho são constantemente cultivadas.

Nessa área, a agricultura irrigada vem sendo desenvolvida desde 1991, utilizando água do aquífero aluvial onde localiza-se os riachos temporários Mimoso, Jatobá e Ipaneminha. Um assentamento na área foi implementado pelo Governo do Estado de Pernambuco, dividindo a área com potencial para agricultura irrigada em lotes com aproximadamente 2 ha, para famílias locais.

Na área estudada, o aquífero aluvial é raso, apresentando espessura média de 10m, com cerca de 15 km de extensão e 300 m de largura, segundo Montenegro et al.(1999).

Na Figura 3 estão representadas as localizações onde foram realizadas leituras com o EM 38. Este mapa, produzido por Corrêa & Ribeiro (2001), apresenta classificação de solos no vale, onde as nomenclaturas RR1, RR2, RU1 e RU2 possuem característica arenosa, enquanto que os demais, RU3-RU6, são ricos em argila. Na área em estudo os pontos de medição com o EM 38 foram distribuídos em paralelos denominados A; B; C; D; 11; e em duas áreas experimentais denominadas “área 1” e “área 2”. Os pontos de leituras representados pelos paralelos e pelas áreas experimentais possuem malha piezométrica instalada. As amostras foram coletadas a diversas profundidades 0-0,3; 0,3-0,6; 0,6-0,9; 0,9-1,2; 1,2-1,5m, as leituras com o EM 38 na “área 1” foram realizadas em malha de 5x5 em local com 1250 m² onde foram realizadas leituras com, “na área 2” as leituras com o EM 38 foram realizadas em malha de 5x3 em local com 990 m².

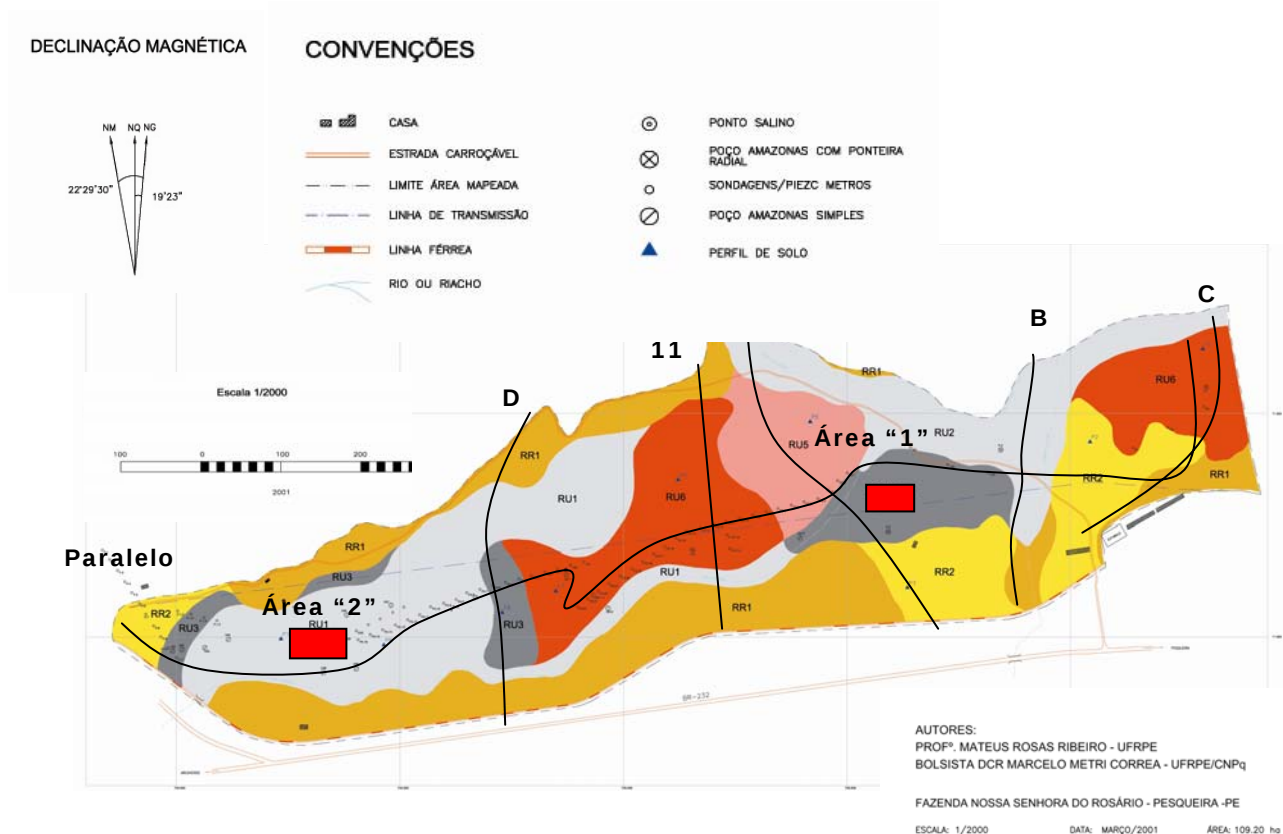


Figura 3. Mapa de classificação de solos do vale aluvial da Fazenda Nossa Senhora do Rosário, Pesqueira (Corrêa & Ribeiro, 2001).

Legenda de identificação do mapa de solos

RR1 Neossolo Regolítico Eutrófico léptípico + Neossolo Litólico Eutrófico típico ambos fase relevo suave ondulado

RR2 Neossolo Regolítico Eutrófico solódico textura média (leve) fase relevo plano e suave ondulado.

RU1 Neossolo Flúvico tb Eutrófico típico textura arenosa ou média (leve) / média (leve) ou arenosa moderadamente drenado.

RU2 Neossolo Flúvico tb Eutrófico típico textura médio / médio (leve) ou arenoso moderadamente drenado

RU3 Neossolo Flúvico Sódico típico textura média (leve) / médio moderadamente drenado

RU4 Neossolo Flúvico Sódico típico textura médio / média ou arenosa moderadamente drenado.

RU5 Neossolo Flúvico Sódico salino textura média / média (leve) ou média imperfeitamente drenado.

RU6 Neossolo Flúvico Sálco textura média imperfeitamente drenado.

As duas áreas dentro do vale nomeadas “área 1” e “área 2” diferem devido ao tipo de solo (Figura 3), cobertura vegetal, salinidade e uso agrícola. A área denominada “1” no momento do experimento estava em pousio, com solo com predominância de textura franco arenosa com textura média com 46%, 28,9% e 25% de areia, silte e argila respectivamente, e com salinidade moderada, superior à da área 2; esta última possui texturas médias com 63,4%, 16,7% e 19,9% de areia, silte e argila respectivamente. Nesta área, a cultura da mamona irrigada estava consorciada com feijão, em um experimento desenvolvido pela EMBRAPA e UFRPE.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima na região é do tipo BSsh (extremamente quente, semi-árido), com precipitação total anual média de 730 mm e evapotranspiração potencial anual média de 1683 mm, segundo Hargreaves (1974).

3.1 Avaliação da salinidade por indução eletromagnética

Para investigar o perfil da condutividade elétrica do solo, as medidas EM38 foram efetuadas nas posições horizontais (Figura 03) e verticais, a diferentes alturas em relação ao nível do solo (0, 0,30, 0,60, 0,90, 1,20 e 1,50 m), conforme metodologia apresentada por Rhoades & Corwin (1981).

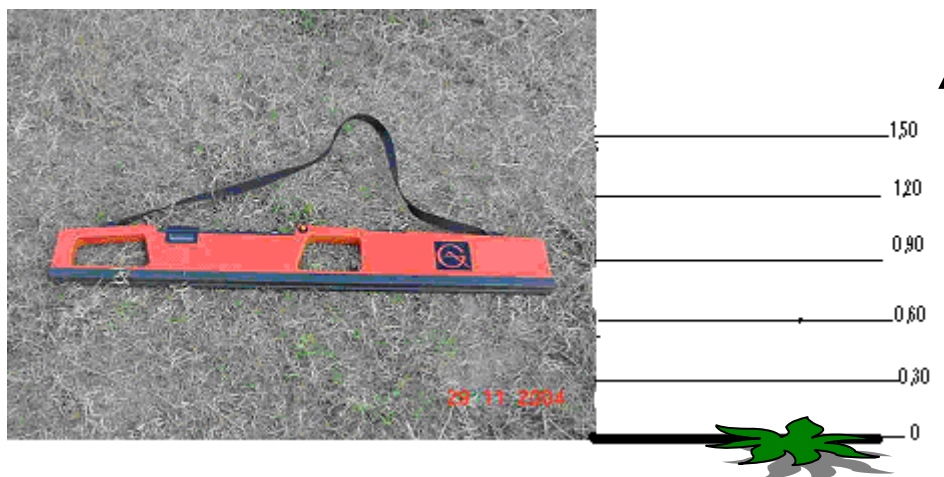


Figura 04. Vista do Geonics EM38 no modo horizontal e alturas em (cm) que ele foi suspenso em relação ao nível do solo.

Para amostras do solo foram coletadas até 1,50m, seguindo a metodologia proposta por McNeil (1980) e foram analisadas utilizando o método da pasta saturada (CEr), conforme descrito por Richards (1951) e EMBRAPA (1997).

Utilizou-se nesse estudo modelos de regressão linear múltipla baseado no logaritmo natural das condutividades aparentes, conforme discutido e proposto por Lesch et al. (1992) e Rhoades et al. (1999).

Adicionalmente, foram adotadas tanto as leituras no modo vertical quanto as leituras no modo horizontal, eliminando assim as colinearidades entre EMv e EMh, como discutido por Lesch et al (1992).

3.2 Determinação da condutividade hidráulica

Para medição da condutividade hidráulica não saturada do solo, foi utilizado o permeâmetro de Guelph.

As medições com o permeâmetro de Guelph foram realizadas na área descrita anteriormente como, “área 1”. Esta área foi escolhida por já ter sido objeto de vários estudos anteriores, de modo a incrementar, assim, o nível de informações. Assim, a detalhada descrição apresentada neste estudo poderá servir de base para novos estudos, em particular para aqueles enfocando sustentabilidade de perímetros irrigados.

Os testes foram realizados utilizando-se quatro cargas hidráulicas: $H_1= 2,5$; $H_2= 5,0$; $H_3=7,5$ e $H_4=10,0$ cm conforme descrito por Montenegro et al. (2002).

3.3 Medições laboratoriais

Amostras de solo foram retiradas com um trado a uma profundidade de 30 cm, inseridas em recipientes hermeticamente fechados. Após chegada ao laboratório foram determinadas medidas de textura, obtendo-se os percentuais, areia, argila e silte, bem como a umidade e a densidade do solo.

As determinações laboratoriais foram realizadas em laboratórios da UFRPE. Em Junho 2007 foram coletadas em trinta (30) locações amostras deformadas de solo. Em cada locação cinco amostras do solo foram obtidas, nas camadas: 0-0,30; 0,30-0,60; 0,60-0,90; 0,90-1,20 e 1,20-1,50 m, de acordo com metodologia proposta por Rhoades e Corwin (1981), para calibrações e verificações utilizando o EM 38.

As leituras de CEa (EM38) foram efetuadas exatamente acima do local onde foram coletadas as amostras. Após a coleta de amostras do solo foram efetuadas quatro determinações: umidade do solo, textura, porosidade e capacidade de campo. As determinações foram realizadas no Laboratório de Física do Solo da UFRPE.

Com o objetivo de efetuar correlações de umidade das amostras com as leituras do EM 38 foram realizadas leituras da umidade pelo método gravimétrico. Os valores de umidade do solo foram obtidos de acordo com:

$$Umidade(\%) = \left(\frac{PSU - PSS}{PSS} \right) \times 100 \quad [28]$$

Em que, PSU é o peso do solo úmido em gramas, PSS representa o peso do solo seco em gramas.

Em todas as amostras, no momento da determinação do PSU, estas foram homogeneizadas dentro de recipiente hermeticamente fechado e no momento da coleta da sub-amostra procedeu-se à utilização de um mesmo recipiente, visando manter o volume da sub-amostra.

A classificação textural do solo foi determinada de acordo com o triângulo americano de classificação textural utilizado pelo United States Department of Agriculture, após adaptações feitas pelo Centro Nacional de Pesquisas de Solos (CNPS)-Embrapa e a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (Lemos & Santos, 1996), conforme a Figura 5.

O solo foi caracterizado granulometricamente, bem como avaliada a densidade do solo e da partícula, ambas seguindo os métodos da EMBRAPA (1997).

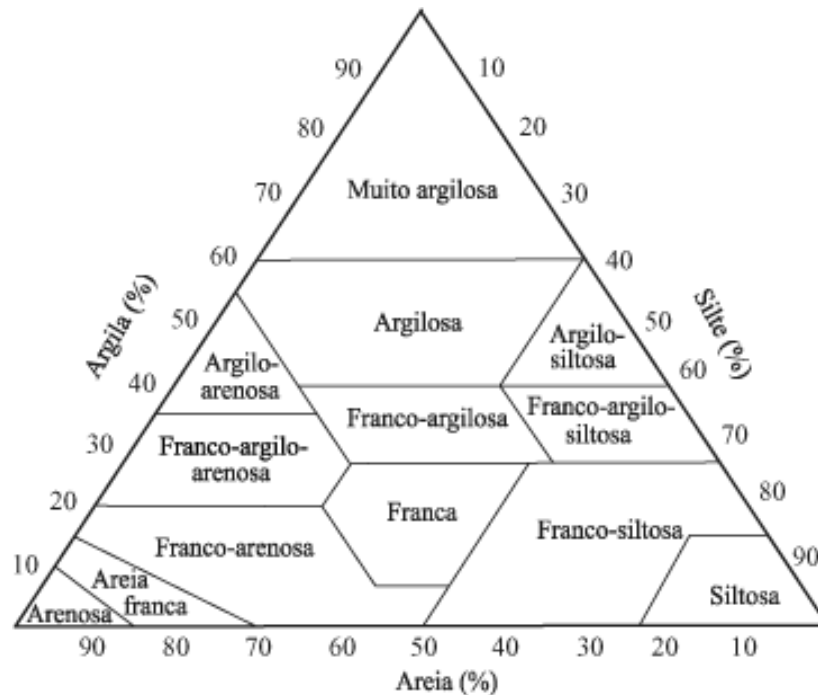


Figura 5. Diagrama triangular das classes texturais do solo (Lemos & Santos, 1996).

Determinou-se a densidade das partículas através do balão volumétrico de 50 ml, utilizando a terra fina seca em estufa (TFSE) a 105°C e álcool etílico absoluto, responsável pela determinação do volume ocupado pelas partículas. Os resultados foram expressos em g/cm³ de volume das partículas.

A densidade global foi determinada utilizando o método do tubo volumétrico, com resultado expresso em g/cm³.

A porosidade total foi calculada a partir dos valores da densidade global e densidade das partículas, expressa em percentagem, segundo a expressão (17), proposta por Vomocil (1965):

$$Pt = \left(1 - \left(\frac{Ds}{Dp} \right) \right) \times 100 \quad [29]$$

em que:

Pt - é a porosidade total do solo (%).

Ds - é a densidade global (g/cm³).

Dp - é a densidade das partículas (g/cm³).

A água disponível foi avaliada utilizando-se a câmara de pressão de Richards (Richards, 1951), no laboratório de Física do Solo da UFRPE. As amostras de solo foram submetidas aos potenciais matriciais de -0,01 e -1,5 MPa, para as profundidades de 0-0,3m, 0,3-0,6m, 0,6-0,9,

0,9-1,2 e 1,2-1,5m. Os potenciais acima correspondem à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente, respectivamente.

As determinações químicas foram realizadas no laboratório de Química do Solo da UFRPE, utilizando a metodologia proposta por Richards (1951). Depois de destorroadas e peneiradas na peneira de 2 mm, as amostras receberam água deionizada até atingirem o ponto de saturação. Após um período de 24 horas de repouso, o extrato da amostra foi obtido utilizando uma bomba de vácuo acoplada a kitassato. No extrato, foram procedidas as determinações químicas no que concerne às determinações do pH, das bases (K e Na) solúveis Thomas (1982), e da CEest (condutividade elétrica do extrato) este após ser efetuada a divisão pela percentagem de saturação foi obtida a CEr (condutividade elétrica real do extrato).

3.4 Regressão múltipla

A regressão linear múltipla foi aplicada para estabelecer as relação funcional entre condutividades elétricas reais em relação às diversas leituras aparentes, e independentes.

Foram utilizadas até 12 (doze) variáveis independentes, obtidas através das leituras efetuadas tanto com o EM 38 na posição vertical quanto na horizontal gerando cinco variáveis em cada posição a 0-0,30; 0,30-0,60; 0,60-0,90;0,90-1,20;1,20-1,50m, em relação ao nível do solo. O modelo estatístico para regressão linear múltipla pode ser escrita como:

$$\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni} + \varepsilon_i \quad \text{Para } i = 1, 2, 3 \dots, n \quad [30]$$

em que $\hat{Y}_i$ é a estimativa da resposta variável; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ são os parâmetros do modelo; $X_1, X_2, \dots, X_n$ são as variáveis explanatórias; e ε_i (desvios) representa a variabilidade em Y não explicada pela regressão.

Os parâmetros do modelo ($\beta_{0,1,2,3\dots n}$) foram estimados através do Método dos Mínimos Quadrados, adotando-se o software Statistica (Statsoft, 2001).

A equação de regressão linear múltipla para a camada de solo 0-0,30m, por exemplo pode ser escrita como:

$$CE_{0-30} = \beta_0 * EM_0 + \beta_1 * EM_1 + \beta_2 * EM_2 + \beta_3 * EM_3 + \beta_4 * EM_4 + \beta_5 * EM_5 + \beta_6 \quad [31]$$

Onde EM_0 , EM_1 , EM_2 , EM_3 , EM_4 , EM_5 , são as leituras de CEa a diversas alturas acima do solo. Tornando-se, em particular, as leituras com o equipamento no modo horizontal, tem-se:

$$CE_{0-30} = \beta_0 * EM_0^H + \beta_1 * EM_1^H + \beta_2 * EM_2^H + \beta_3 * EM_3^H + \beta_4 * EM_4^H + \beta_5 * EM_5^H + \beta_6 \quad [32]$$

De modo a minimizar valores discrepantes nas leituras aparentes, procurou-se estabelecer as correlações múltiplas lineares entre os logaritmos naturais dessas leituras de condutividade elétrica real.

Assim, os modelos de regressão analisados podem ser escritos como:

$$\ln EC_{0-30} = \alpha_0^H * \ln EM_0^H + \alpha_1^H * \ln EM_1^H + \alpha_2^H * \ln EM_2^H + \alpha_3^H * \ln EM_3^H + \alpha_4^H * \ln EM_4^H + \alpha_5^H * \ln EM_5^H + \alpha_6 \quad [33]$$

$$+ \alpha_0^V * \ln EM_0^V + \alpha_1^V * \ln EM_1^V + \alpha_2^V * \ln EM_2^V + \alpha_3^V * \ln EM_3^V + \alpha_4^V * \ln EM_4^V + \alpha_5^V * \ln EM_5^V$$

Admitindo-se que elevados coeficientes de determinação R^2 possam ser verificados, então tem-se:

$$CE_{0-30} = e^{\ln CE_{0-30}} \quad [34]$$

3.5 Caracterização Geoestatística

Inicialmente, os dados foram submetidos a uma análise de estatística descritiva, onde foi observada a Normalidade através do método estatístico de (Kolmogorov-Smirnov) e determinados a média, mediana, moda, coeficientes de assimetria e curtose, variância, desvio padrão e coeficiente de variação. Posteriormente, procedeu-se a uma análise variográfica, onde são confeccionados semivariogramas experimentais e teóricos, que servem de base para a construção dos mapas de isolinhas das propriedades de interesse. Para confecção dos mapas de isolinhas trabalhou-se com o software Surfer 8.0.

A função semivariograma, que identifica a estrutura de dependência, relaciona a variância das diferenças entre valores observados, γ , com a distância de separação desses pontos (Montenegro et al. 2004). As semivariâncias experimentais podem ser estimadas por:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad [35]$$

em que γ é o valor da semivariância estimada a partir dos dados experimentais; $N(h)$ é o número de pares de valores $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$ separados por um vetor h .

Neste estudo, foram verificados os seguintes modelos teóricos:

Modelo Esférico

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]; 0 < h < a \quad [36]$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1; h \geq a$$

Modelo exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3 \frac{h}{a}\right) \right] \quad [37]$$

Modelo Gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right]; h \neq 0 \quad [38]$$

Para a modelagem do semivariograma e sua validação, foi empregada a ferramenta geoestatística GS+ (Robertson, 1998).

Quanto à magnitude da dependência espacial (DE), os semivariogramas foram classificados segundo critério proposto por Cambardella et al. (1994), no qual os semivariogramas podem ser considerados como forte, moderado ou fraco a dependência espacial. O critério se baseia na relação:

$$DE = \frac{C_0}{C_0 + C_s} \times 100 \quad [39]$$

Sendo os valores de DE categorizados em inferiores a 25%, entre 25 e 75%, e superiores a 75%, denotando, respectivamente, forte, moderada e fraca dependência espacial.

Os parâmetros da função de semivariância com ajuste dos modelos teóricos foram usados na construção de mapas de isolinhas das propriedades estudadas pelo processo de krigagem, visando definir zonas de variabilidade semelhantes e dividir a área por sub-regiões mais homogêneas.

Dentre as formas de krigagem, foi utilizada a ordinária, a qual não exige o conhecimento da média da variável regionalizada, sendo tal interpolador definido matematicamente por (Vieira, 2000):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad [40]$$

em que:

Z^* são valores estimados para qualquer local x ;

N é o número de valores medidos;

λ_i são os pesos associados a cada valor medido, $Z_{(x_i)}$.

3.6 Validação cruzada

Foi utilizado o processo de validação cruzada, que consiste em se reavaliar pelo estimador os valores amostrais conhecidos, retirando-se um a um e calculando-os como se não fossem conhecidos (Zimback, 2003). A diferença entre o valor observado e o valor predito é chamada de erro.

Jonhston (1997) descreve o processo para se avaliar o erro produzido pela krigagem. São calculadas as médias dos erros e os seus respectivos desvios padrão, assim como os erros normalizados e os seus desvios padrão. A média dos erros normalizados deve tender para zero, e o desvio normalizado deve aproximar-se de 1 (um).

3.7 Geoestatística Indicadora

Esta ferramenta geoestatística busca estimar as probabilidades de que a variável de interesse seja menor ou igual a um valor limite especificado, z_c (Journel, 1983). A metodologia é baseada na função binária $I(X, z_c)$, estimada nos locais de campo $X(x,y)$, a qual pode ser definida como:

$$I(X, z_c) = \begin{cases} 1, & z(x) \leq z_c \\ 0, & z(x) > z_c \end{cases} \quad [41]$$

Para dado limite z_c , a função randômica $I(X, z_c)$ é binomialmente distribuída, com valor esperado estimada através da média indicadora experimental $m(z_c)$ e variância estimada dada por Journel (1983):

$$\text{var}[I(x, z_c)] = m(z_c)[1 - m(z_c)] \quad [42]$$

A função $Z(X) = I(X, z_c)$ deve ser aplicada no estimador experimental clássico:

$$Y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(X_i) - z(X_i + h)]^2 \quad [43]$$

Assim, permite-se estimar as semi-variâncias indicadoras clássicas para o domínio, em que $\gamma(h)$ é o valor da semivariância experimental para a distância de separação h , $N(h)$ o número de pares de observações nessa distância de separação, e $Z(X_i)$ e $Z(X_i+h)$ representam duas observações quaisquer separadas pela distância h . O valor limite Z_c também pode ser denominado de nível de corte ou “Cut-off”.

4.0 RESULTADOS E DISCURSSÃO

Previamente à avaliação da CEr do solo, buscou-se a sua caracterização da granulometria, considerando que os parâmetros físicos como a textura e químicos como a condutividade elétrica estão relacionados com o fluxo de elétrons no meio poroso McNeill, 1980; GEONICS, 1999. Os mesmos autores relatam a importância do teor de argila, na avaliação umidade e da salinidade. Outros autores, como Yao et al. (2007), reforçam a importância da determinação de parâmetros umidade, textura, e densidade, que estão relacionados com a salinidade.

Assim a Tabela 3 apresenta a estatística descritiva das propriedades físicas dos solos, distribuídos ao longo do vale aluvial da Fazenda Rosário.

Tabela 3. Estatística descritiva das características físicas e hídricas para umidade, areia, silte, argila porosidade e AD (Água Disponível), coletadas em todo vale aluvial da Fazenda Rosário simultaneamente às leituras com o EM38

Variável	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
Umidade%	0-0,3	30	23,12	12,59	6,66	41,98	6,54	0,28
	0,3-0,6		22,09	11,62	4,93	28,27	4,80	0,22
	0,6-0,9		21,33	9,80	3,95	29,78	6,09	0,29
	0,9-1,2		22,16	10,39	3,76	45,27	9,23	0,42
	1,2-1,5		22,62	12,88	4,13	23,14	5,37	0,24
Areia%	0-0,3	30	49,00	49,24	22,60	79,62	16,84	0,34
	0,3-0,6		51,46	47,24	22,96	91,12	15,72	0,31
	0,6-0,9		56,12	55,60	32,60	91,30	14,55	0,26
	0,9-1,2		58,21	59,32	16,60	87,24	19,70	0,34
	1,2-1,5		53,78	48,82	16,60	87,48	23,79	0,44
Silte%	0-0,3	30	28,58	28,00	9,18	46,36	11,13	0,39
	0,3-0,6		25,28	27,44	3,00	43,72	9,62	0,38
	0,6-0,9		22,67	21,68	3,00	43,36	9,40	0,41
	0,9-1,2		20,53	22,36	1,36	44,00	11,79	0,57
	1,2-1,5		23,76	28,36	2,64	46,36	14,13	0,59
Argila%	0-0,3	30	22,41	22,32	9,38	33,32	6,08	0,27
	0,3-0,6		23,26	24,4	5,88	41,32	7,18	0,31
	0,6-0,9		21,21	21,32	5,70	38,32	6,74	0,32
	0,9-1,2		21,26	18,32	10,38	39,40	8,64	0,41
	1,2-1,5		22,46	23,40	7,02	39,04	10,02	0,45
Porosidade%	0-0,3	30	43,70	44,33	34,13	51,89	4,60	0,11
	0,3-0,6		43,16	43,75	34,27	49,52	4,06	0,09
	0,6-0,9		44,52	45,06	38,28	48,64	2,64	0,06
	0,9-1,2		42,90	42,90	35,93	50,31	3,74	0,09
	1,2-1,5		42,95	43,62	29,96	50,87	4,95	0,12
	0-0,3	30	8,69	8,92	2,00	15,55	3,77	0,43

AD %							
	0,3-0,6	8,56	9,26	2,57	13,32	2,70	0,32
	0,6-0,9	6,61	7,09	0,46	10,59	2,39	0,36
	0,9-1,2	5,36	5,42	0,37	12,50	3,75	0,69
	1,2-1,5	6,70	8,17	1,83	12,26	3,41	0,51

As amostras estão distribuídas nas áreas denominadas “área 2”, “área 1” e em paralelos distribuídos no vale.

Na Tabela 3 é observada uma elevação da umidade, nas amostras localizadas nas camadas mais superficiais. Este comportamento pode estar relacionado às determinações de AD (água disponível), que também nestas camadas apresentam valores superiores aos demais. Na mesma tabela é verificado um acréscimo do percentual médio de areia em todas as profundidades, em todos os conjuntos de amostras.

Na Tabela 4 está apresentada a estatística clássica de parâmetros químicos do solo nas áreas denominadas “área 1”, “área 2” e nos paralelos distribuídos no vale. É verificado um aumento da CE_r que é a condutividade elétrica do extrato de saturação até a camada de 0,90m, comportamento encontrado por Bastos (2004), na “área 1” o pH foi de terminado através do extrato da pasta de saturação apresentou um suave decréscimo a medida que foi atingindo camadas mais profundas.

Tabela 4. Estatística descritiva das análises químicas realizadas para CE_r e pH em amostras coletadas na Fazenda Rosário no momento da leitura com EM38

Variável	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
CE_r	0-0,3	26	3,63	2,71	0,28	12,51	3,13	0,86
	0,3-0,6		5,21	2,86	0,26	29,79	6,55	1,26
	0,6-0,9		7,23	5,51	0,27	31,37	6,98	0,97
	0,9-1,2		5,66	5,34	0,28	15,78	3,90	0,69
	1,2-1,5		5,07	3,69	0,28	12,85	3,56	0,70
pH	0-0,3	26	7,17	7,2	6,5	7,70	0,35	0,05
	0,3-0,6		6,98	7,00	6,4	7,7	0,42	0,06
	0,6-0,9		6,92	6,85	6,30	8,10	0,44	0,06
	0,9-1,2		6,85	6,95	4,40	7,90	0,69	0,10
	1,2-1,5		6,96	6,90	6,30	8,00	0,48	0,07

Considerando a heterogeneidade dos solos ao longo do vale, optou-se pela subdivisão das áreas para efeito de caracterização através da estatística descritiva bem como para análise da condutividade elétrica.

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam a estatística descritiva da umidade inicial do solo, nas áreas em estudo, no momento em que foram efetuadas as leituras com o EM 38. Nota-se de um modo geral, uma certa homogeneidade no sentido vertical da umidade, exceto na área 2 a qual apresentou um maior teor de umidade nas camadas superiores (0–0,30 e 0,30– 0,60m)

devido ao fato de se tratar de uma área irrigada. Neste local existe um consórcio de mamona com feijão.

Tabela 5. Estatística descritiva da umidade do solo na área “área 1”, na Fazenda Rosário, no momento da leitura com EM38

Variável	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
Umidade%	0-0,3	10	11,16	11,38	6,66	14,33	2,38	0,213
	0,3-0,6		12,01	11,66	5,19	28,27	6,19	0,515
	0,6-0,9		10,80	9,84	5,03	21,15	4,70	0,435
	0,9-1,2		10,88	10,45	3,76	17,03	3,94	0,362
	1,2-1,5		12,86	13,39	4,24	18,83	4,19	0,326

Tabela 6. Estatística descritiva da umidade do solo na área “área 2”, na Fazenda Rosário, no momento da leitura com EM38

Variável	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
Umidade%	0-0,3	8	12,74	14,07	8,04	16,54	3,23	0,25
	0,3-0,6		10,19	8,98	6,41	13,83	2,98	0,29
	0,6-0,9		8,04	8,02	3,95	11,94	2,99	0,37
	0,9-1,2		7,76	7,89	4,29	12,66	2,96	0,38
	1,2-1,5		8,67	7,94	4,13	15,13	4,90	0,57

Tabela 7. Estatística descritiva umidade do solo realizado nos pontos “paralelos”, distribuídos na Fazenda Rosário, no momento da leitura com EM38

Variável	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
Umidade%	0-0,3	12	16,49	15,27	6,71	41,98	10,33	0,63
	0,3-0,6		12,07	14,46	4,93	17,78	4,63	0,38
	0,6-0,9		14,69	17,46	4,78	29,78	7,86	0,54
	0,9-1,2		19,55	20,86	5,74	45,27	12,79	0,65
	1,2-1,5		14,93	13,18	5,83	23,14	6,09	0,41

As caracterizações das áreas separadamente permitem uma descrição mais adequada das propriedades físicas dos solos ao longo do vale. Com base no triângulo textural, verificou-se que os solos se enquadram nas classes de textura franca, franco-arenosa e franco siltosa.

Na área 1 (Tabela 8), não pode-se observar nenhuma variação abrupta de textura entre as profundidades, embora se verifique uma maior percentagem de areia nas camadas 0,60-0,90, e 0,90-1,2 m. Esta variação de textura também foi verificada por Bastos (2004), em estudos na mesma área visto que se trata de uma área sedimentar.

Os valores medidos da condutividade hidráulica saturada observada na mesma Tabela 8, apresenta valores obtidos próximos aos encontrados por Bastos (2004) através de testes realizados com o Permeâmetro de Guelph no local de estudo os teste com o permeâmetro de Guelph realizado na área 1 foram executados em uma malha distribuída em 5 x 5 e

apresentaram valores maiores na porção norte da área onde a textura é mais arenosa como pode ser observado na figura 33b no mapa de krigagem bem como a parte norte da área em relação ao riacho Mimoso possui uma maior proximidade do mesmo.

Na Tabela 9, pode-se verificar um comportamento diferenciado da área 2, esta em relação às demais áreas mais próxima do talvegue, sendo encontradas maiores percentagens de areia, atingindo valores superiores a 58%, e reduzidas percentagens das demais frações, principalmente do silte este comportamento é justificado nesta área devido sua proximidade do talvegue e com isso uma maior deposição de material com maior textura.

A partir da Tabela 10, nota-se o comportamento intermediário da granulometria dos solos da área dos paralelos distribuídos no vale em relação às duas outras áreas. Adicionalmente, verifica-se uma elevada homogeneidade do perfil.

Os teores de argila têm relevante influência na condutividade elétrica aparente do solo, segundo McNeill (1980) e Yao et al. (2007). Assim, espera-se observar respostas diferenciadas do método de indução eletromagnética, quando aplicado nas áreas 1 e 2 e nos paralelos.

Tabela 8. Estatística descritiva da textura do solo (areia%, silte%, argila%), na área 1, localizada na Fazenda Rosário

Variável	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
Areia%	0-0,3	10	37,80	37,82	24,96	55,32	10,27	0,27
	0,3-0,6		37,93	41,32	22,96	47,24	8,19	0,22
	0,6-0,9		50,73	52,64	34,32	72,24	11,95	0,24
	0,9-1,2		55,20	57,78	31,68	86,24	16,83	0,30
	1,2-1,5		48,24	42,50	23,24	84,24	18,07	0,37
Silte%	0-0,3	10	36,53	37,86	26,36	42,72	5,93	0,16
	0,3-0,6		33,80	33,36	27,44	43,72	4,27	0,13
	0,6-0,9		24,60	23,86	12,00	34,00	6,63	0,27
	0,9-1,2		22,49	23,18	3,00	35,64	9,92	0,44
	1,2-1,5		27,15	30,68	3,00	40,00	10,97	0,40
Argila%	0-0,3	10	25,66	24,82	18,32	33,32	4,66	0,18
	0,3-0,6		28,26	25,32	24,32	41,32	5,32	0,19
	0,6-0,9		24,67	23,86	15,76	38,32	6,88	0,28
	0,9-1,2		22,31	20,32	10,76	35,32	7,49	0,34
	1,2-1,5		24,61	25,82	12,76	36,76	7,48	0,30
K sat cm/dia	0-0,3	15	27,64	26,04	16,15	37,28	6,41	0,23
Alfa (cm ⁻¹)	0-0,3	15	0,04	0,04	0,02	0,05	0,01	0,25

Tabela 9. Estatística descritiva da textura do solo (areia%, silte%, argila%) na área 2 localizada na Fazenda Rosário

Variável	Profundidade	Média	N	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
Areia%	0-0,3	58,68	8	63,24	32,60	69,96	11,99	0,20
	0,3-0,6	61,94		63,92	42,96	69,60	8,92	0,14
	0,6-0,9	62,21		65,60	45,24	73,96	10,50	0,17
	0,9-1,2	68,54		76,54	37,60	87,24	18,50	0,27
	1,2-1,5	65,80		77,96	36,60	86,60	23,48	0,36
Silte	0-0,3	20,2	8	17,7	14,3	38,0	7,8	0,39
	0,3-0,6	16,5		15,5	11,6	26,3	4,6	0,28
	0,6-0,9	17,3		17,1	7,6	28,0	6,6	0,38
	0,9-1,2	13,5		10,9	1,4	32,0	11,4	0,84
	1,2-1,5	16,0		8,8	2,6	34,0	13,8	0,86
Argila	0-0,3	21,1	8	20,3	15,8	29,4	4,5	0,21
	0,3-0,6	21,6		18,8	16,8	30,8	5,3	0,25
	0,6-0,9	20,5		19,6	13,4	28,8	5,2	0,25
	0,9-1,2	18,0		15,3	10,4	30,4	7,6	0,42
	1,2-1,5	18,2		14,8	7,4	31,8	9,9	0,54

Tabela 10. Estatística descritiva da textura do solo (areia%, silte%, argila%), em pontos nos paralelos localizados na Fazenda Rosário

Variável	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
Areia%	0-0,3	12	49,65	50,10	22,60	79,62	18,82	0,37
	0,3-0,6		55,35	48,10	33,96	91,12	17,45	0,31
	0,6-0,9		55,23	55,60	32,60	91,30	18,49	0,33
	0,9-1,2		51,93	54,60	16,60	82,48	22,30	0,42
	1,2-1,5		48,69	47,10	16,60	87,48	28,48	0,58
Silte	0-0,3	12	29,28	29,68	11,00	46,36	11,31	0,38
	0,3-0,6		24,27	25,50	3,00	35,00	10,01	0,41
	0,6-0,9		25,75	23,02	3,00	43,36	12,29	0,48
	0,9-1,2		24,64	25,04	6,82	44,00	12,84	0,52
	1,2-1,5		27,26	29,50	4,50	46,36	16,42	0,60
Argila	0-0,3	12	21,07	21,55	9,38	31,04	7,64	0,36
	0,3-0,6		20,38	23,40	5,88	31,04	8,08	0,39
	0,6-0,9		19,02	19,72	5,70	29,04	7,01	0,36
	0,9-1,2		23,42	23,54	10,70	39,40	10,32	0,44
	1,2-1,5		24,05	23,40	7,02	39,04	12,54	0,52

A avaliação da porosidade do perfil, das áreas em estudo, apresentou uma homogeneidade nos valores médios nas três áreas, conforme pode ser verificado nas Tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11. Estatística descritiva da porosidade, para a área 1, localizada na Fazenda Rosário

Variável	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
Porosidade%	0-0,3	10	47,18	46,65	43,34	51,89	2,98	0,06
	0,3-0,6		44,69	46,23	38,41	49,52	4,10	0,09
	0,6-0,9		44,96	45,98	38,28	48,64	3,11	0,07
	0,9-1,2		43,50	44,54	36,05	47,20	3,53	0,08
	1,2-1,5		42,97	43,64	35,05	48,63	4,19	0,10

Tabela 12. Estatística descritiva da porosidade, para a área 2 localizada na Fazenda Rosário

Variável	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
Porosidade%	0-0,3	8	42,25	42,04	34,14	47,96	4,45	0,11
	0,3-0,6		42,60	43,61	35,14	48,80	4,69	0,11
	0,6-0,9		44,15	43,55	41,18	48,53	2,41	0,05
	0,9-1,2		42,92	42,20	37,54	49,26	3,67	0,09
	1,2-1,5		43,04	41,90	36,61	47,70	4,01	0,09

Tabela 13. Estatística descritiva da porosidade em pontos nos paralelos, localizados na Fazenda Rosário

Variável	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
Porosidade%	0-0,3	12	41,85	40,95	34,13	49,40	4,46	0,11
	0,3-0,6		42,21	43,18	34,27	45,41	3,43	0,08
	0,6-0,9		44,40	45,05	40,65	47,62	2,51	0,06
	0,9-1,2		42,63	41,26	35,93	50,31	4,27	0,10
	1,2-1,5		42,50	45,29	29,96	50,87	6,96	0,16

A água disponível no solo, para as três áreas, está apresentada nas Tabelas 14 a 16, podendo-se verificar que a área 2, devido a sua característica mais arenosa, apresenta baixos índices de água disponível. Os cultivos na área 2 requerem maiores dotações hídricas que as demais áreas estudadas. Tal fato tende a influenciar a condutividade elétrica do solo, pelo fato da água utilizada na irrigação ser salobra, com condutividade elétrica média de 1,0 dS/m.

Tabela 14. Estatística descritiva de água disponível na área 1 localizada na Fazenda Rosário

Variável	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
AD%	0-0,3	10	11,33	10,85	6,70	15,55	3,29	0,29
	0,3-0,6		9,69	9,11	8,10	11,84	1,58	0,16
	0,6-0,9		6,91	6,95	4,40	10,59	3,17	0,45
	0,9-1,2		5,73	5,53	5,22	10,45	3,53	0,61
	1,2-1,5		7,93	8,80	6,46	10,68	3,11	0,39

Tabela 15. Estatística descritiva de água disponível na área 2 localizada na Fazenda Rosário

Variável	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
AD%	0-0,3	8	5,92	6,20	2,09	8,93	2,64	0,44
	0,3-0,6		6,12	6,10	4,31	9,86	3,26	0,53
	0,6-0,9		5,40	5,94	3,89	8,06	2,56	0,47
	0,9-1,2		2,39	2,35	2,24	7,89	2,65	1,11
	1,2-1,5		3,64	2,72	1,88	8,47	2,76	0,75

Tabela 16. Estatística descritiva de água disponível na em pontos nos paralelo, localizados na Fazenda Rosário

Variável	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
AD%	0-0,3	12	8,08	8,92	2,00	11,02	2,96	0,36
	0,3-0,6		9,74	10,68	2,57	13,32	3,41	0,35
	0,6-0,9		7,56	8,52	0,46	9,55	3,17	0,41
	0,9-1,2		8,21	9,15	0,37	12,50	3,86	0,47
	1,2-1,5		9,13	10,53	1,83	12,26	4,22	0,46

As Tabelas 17, 18 e 19 apresentam a estatística descritiva da CEr e pH das análises químicas de laboratório com as amostras coletadas. Nota-se um aumento da condutividade elétrica com a profundidade, na faixa de 0 a 0,9 m de profundidade, e um posterior decréscimo. Conforme já discutido, a distribuição espacial no sentido vertical de salinidade tende a influenciar as respostas obtidas com o uso de equipamentos de indução eletromagnética, bem como alterar os modelos de regressão múltipla, para avaliação da salinidade do solo. No entanto, o fato das três áreas apresentarem perfil com forma semelhante, mesmo com magnitudes de salinidade diferentes, sugere que as funções respostas do EM 38 possam ser similares.

As camadas mais profundas podem sofrer diluições de sais devido a ascensão capilar, nos períodos de seca, favorecidos pela evaporação e evapotranspiração. Esta característica de um aumento de condutividade elétrica dos solo com a profundidade, nas camadas mais superficiais, apresentando um máximo, e diminuindo quando se aproxima do lençol, está

associada a lixiviações parciais do perfil do solo, promovidos pelas chuvas e irrigações sucessivas.

Yao et al. (2007), em estudos com o EM 38 em área com perfil invertido, verificaram redução da condutividade elétrica a partir de 0,40m de profundidade.

Tabela 17. Estatística descritiva da condutividade elétrica e do pH do extrato saturado na área 1

Fator	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
CEes	0-0,3	10	5,15	4,07	2,58	8,87	2,18	0,42
	0,3-0,6		6,56	6,44	1,24	17,59	4,34	0,66
	0,6-0,9		7,01	6,40	3,86	11,82	2,53	0,36
	0,9-1,2		6,02	6,43	2,61	9,71	2,09	0,35
	1,2-1,5		5,53	6,90	1,60	8,62	2,44	0,44
pH	0-0,3		7,45	7,45	7,20	7,7	0,16	0,02
	0,3-0,6		6,97	6,95	6,70	7,3	0,27	0,04
	0,6-0,9		6,90	6,90	6,60	7,2	0,24	0,03
	0,9-1,2		7,00	7,05	6,60	7,3	0,26	0,04
	1,2-1,5		6,98	6,95	6,40	7,5	0,46	0,07

Tabela 18. Estatística descritiva da condutividade elétrica e do pH do extrato saturado, na área 2

Fator	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
CEr	0-0,3	8	2,03	1,25	0,56	12,51	4,61	2,27
	0,3-0,6		3,21	1,62	0,87	9,51	3,23	1,01
	0,6-0,9		4,84	4,00	1,68	10,76	3,50	0,72
	0,9-1,2		4,84	5,30	2,21	7,82	2,24	0,46
	1,2-1,5		3,26	2,28	1,39	8,53	2,65	0,81
pH	0-0,3		6,95	7,05	6,60	7,2	0,30	0,04
	0,3-0,6		6,92	6,90	6,40	7,5	0,48	0,07
	0,6-0,9		6,87	6,80	6,50	7,4	0,40	0,06
	0,9-1,2		6,89	6,90	6,40	7,5	0,47	0,07
	1,2-1,5		6,80	6,90	6,30	7,5	0,43	0,06

Tabela 19. Estatística descritiva da condutividade elétrica e do pH do extrato saturado, das amostras coletadas nos paralelos

Fator	Profundidade	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	C V
CEr	0-0,3	12	10,74	1,51	0,44	63,50	23,34	2,17
	0,3-0,6		11,01	1,27	0,71	41,40	17,13	1,56
	0,6-0,9		10,58	6,50	0,59	31,37	11,73	1,11
	0,9-1,2		8,98	4,77	0,67	25,00	9,45	1,05
	1,2-1,5		7,58	7,11	1,39	12,85	4,63	0,61
pH	0-0,3	12	7,10	7,20	6,50	7,6	0,41	0,06
	0,3-0,6		7,10	7,10	6,40	7,7	0,47	0,07
	0,6-0,9		7,06	7,10	6,40	8,1	0,63	0,09
	0,9-1,2		7,01	7,00	6,40	7,9	0,59	0,08
	1,2-1,5		7,30	7,30	6,60	8,0	0,51	0,07

4.1 Estimativa de condutividade elétrica do solo a partir dos modelos da literatura

A aplicação dos modelos de Rhoades et al. (1980), Rhoades et al. (1989) e Rhoades et al. (1999) permite verificar os desvios nas estimativas da salinidade, para o vale do riacho Mimoso. Nas Figuras 6 a 18, pode-se observar as relações entre condutividade elétrica medida em laboratório através do extrato de saturação CEr e estimadas CEm obtida através de modelos disponíveis na literatura.

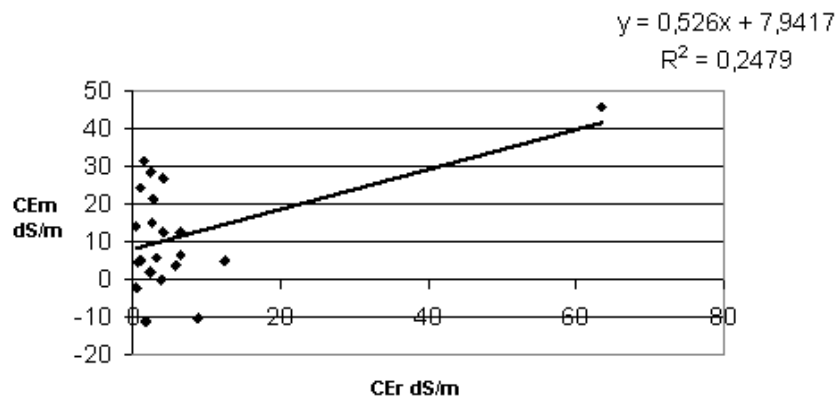


Figura 6. Modelo 0-0,3m para leitura horizontal proposto por Rhoades et al. (1980).

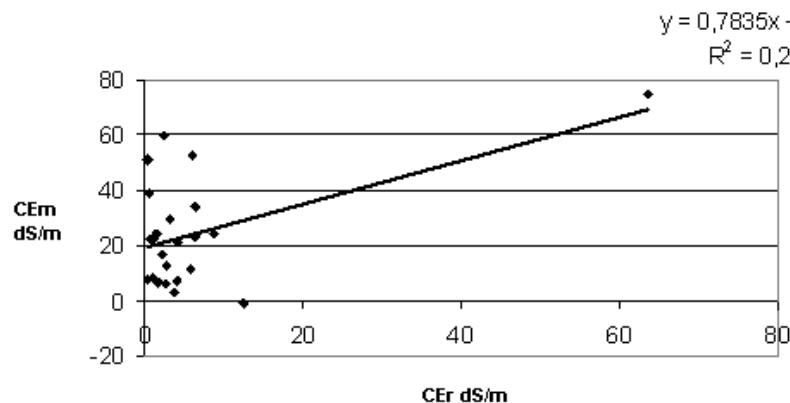


Figura 7. Modelo 0-0,3m para leitura vertical proposto por Rhoades et al. (1980).

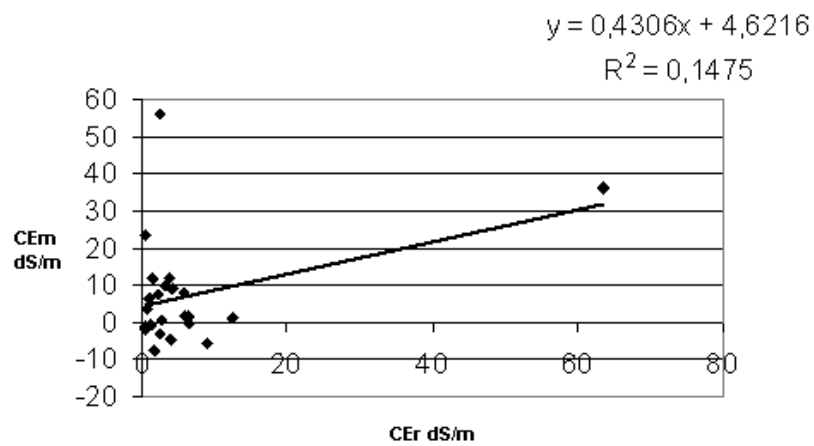


Figura 8. Modelo 0-0,30m proposto por Rhoades et al. (1989).

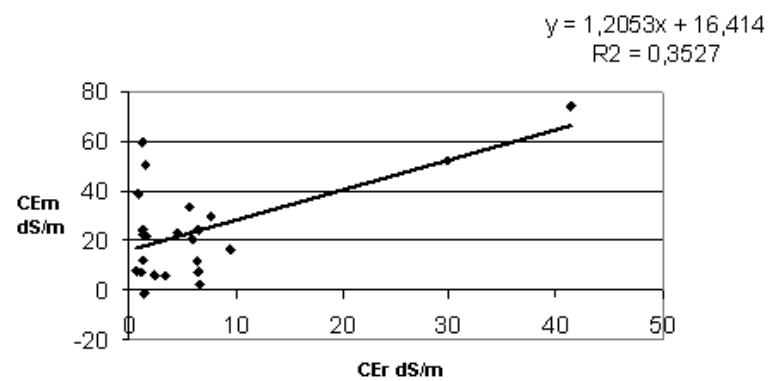


Figura 9. Modelo 0,3-0,6m para leitura horizontal proposto por Rhoades et al. (1980).

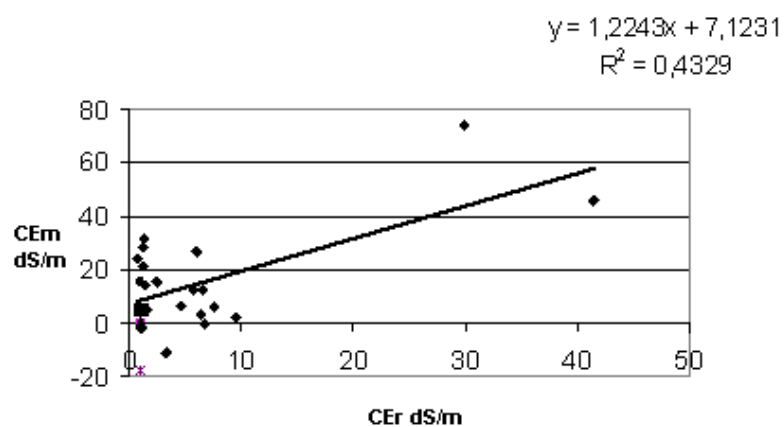


Figura 10. Modelo 0,3-0,6m vertical proposto por Rhoades et al. (1980).

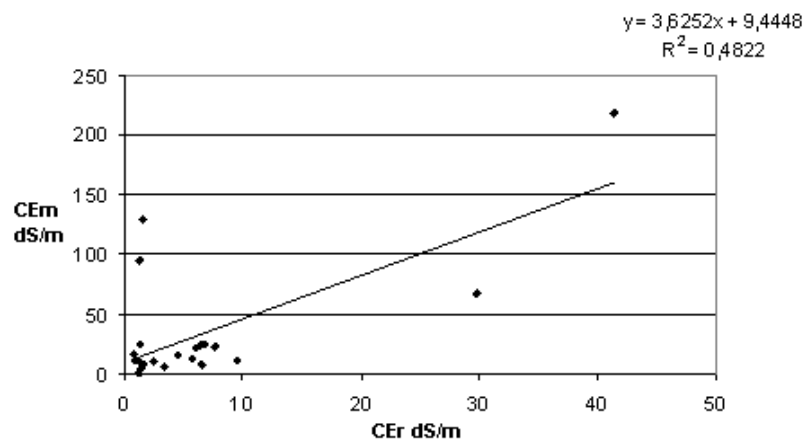


Figura 11. Modelo proposto por Rhoades et al. (1989).

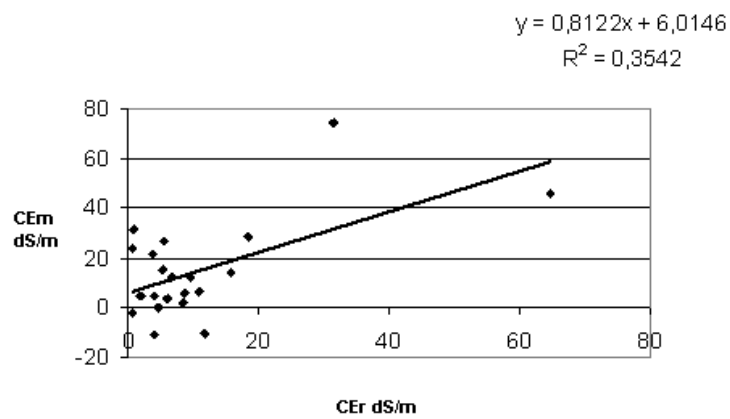


Figura 12. Modelo 0,6-0,9m para leitura horizontal proposto por Rhoades et al. (1980).

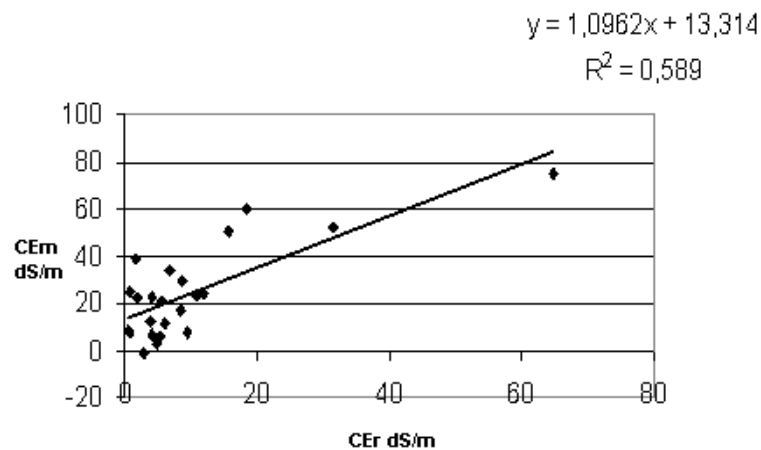


Figura 13. Modelo 0,6-0,9m para leitura vertical proposto por Rhoades et al. (1980).

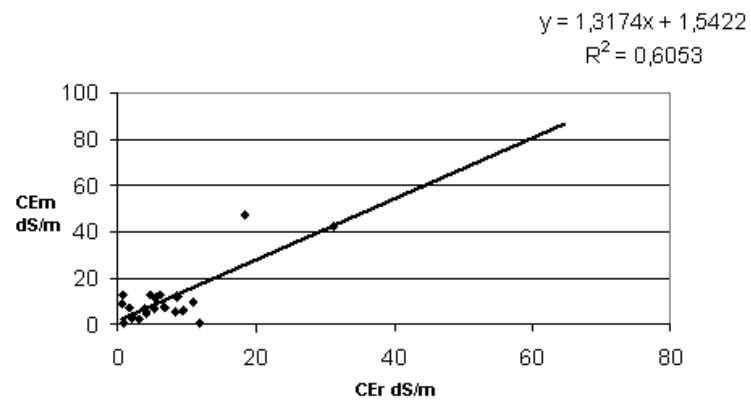
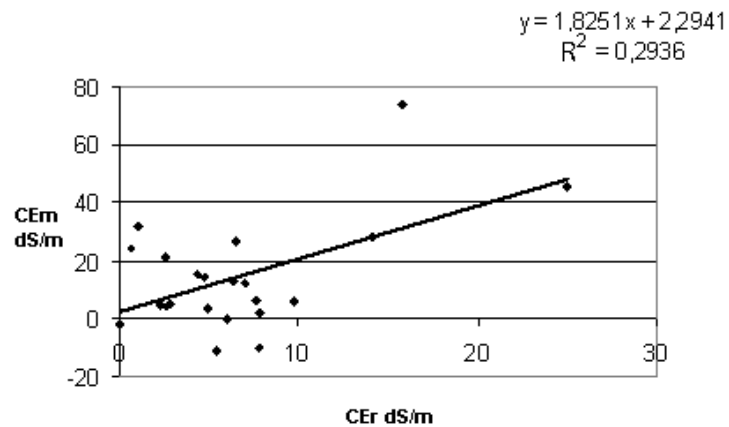
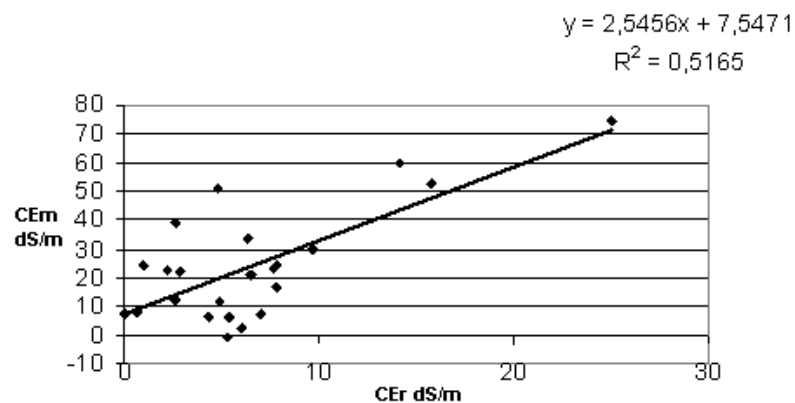


Figura 14. Modelo 0,6-0,9m proposto por Rhoades et al. (1989).



Figuras 15. Modelo 0,90-1,20m para leitura horizontal proposto por Rhoades et al.(1980).



Figuras 16. Modelo 0,90-1,20m para leitura vertical proposto por Rhoades et al.(1980).

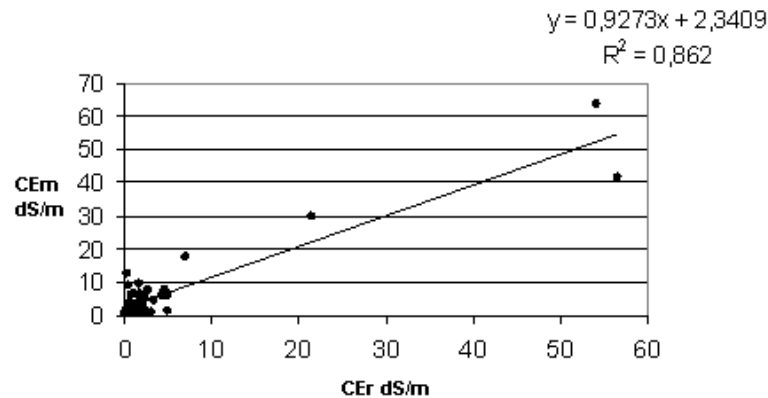


Figura 17. Modelo proposto por Rhoades et al. (1999) para as profundidades de 0-0,30m; 0,30-0,60m.

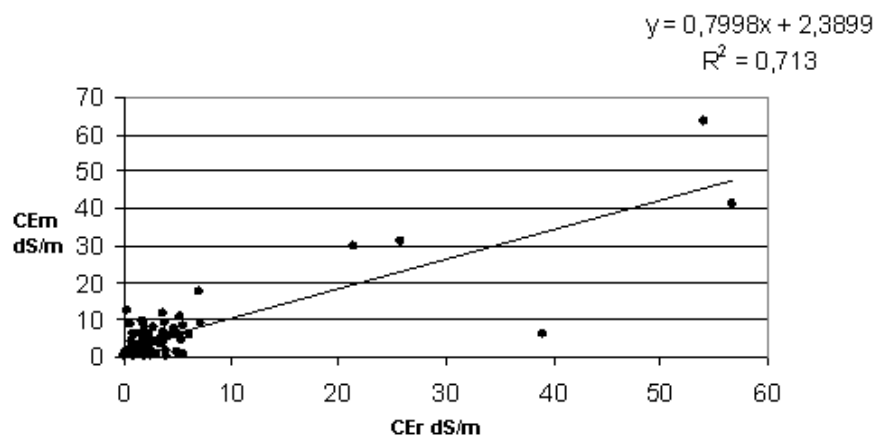


Figura 18. Modelo proposto por Rhoades (1999) para as profundidades de 0-0,30m; 0,30-0,60m; 0,60-0,90m.

De um modo geral, os modelos existentes mantêm uma adequada tendência nas estimativas, em particular quando se trata de salinidades elevadas. Dessa forma, constituem-se em ferramentas adequadas quando se deseja estudar áreas exibindo elevada amplitude de salinidade, e em escala regional.

4.2 Desempenho das calibrações locais

Considerando o baixo desempenho dos modelos disponíveis para representar a salinidade dos solos em escala de lote, como evidenciado nas Figuras 6 a 18, equações de regressão múltipla foram desenvolvidas utilizando as leituras do EM 38 a diferentes alturas em relação à superfície do solo. A Tabela 20 apresenta os valores obtidos para calibrações locais para as áreas 1 e 2.

Os coeficientes da regressão múltipla apresentados na Tabela 20, desenvolvidas para o logaritmo da condutividade elétrica aparente, com base nas leituras realizadas apenas para a área 1, e também para uma representação completa das áreas 1 e 2.

Observa-se que um modelo empírico local baseado em três níveis de medição acima da superfície do solo (0; 0,3m e 0,6m) permitiu adequada estimativa da condutividade elétrica da camada 0-0,30m, com coeficientes de determinação de 0,86. Na mesma Tabela 20, pode-se verificar que a utilização de seis níveis de medição conduz a um adequado coeficiente de determinação $R^2=0,94$, permitindo o desenvolvimento de um modelo de regressão aplicável tanto à área 1, quanto à área 2. Os valores de logaritmos estimados estão na Tabela 21. Na Tabela 22, estão apresentados os coeficientes de regressão múltipla para a camada 0,30-0,60m, utilizando 3 níveis, de medição e também 6 níveis. Pode-se notar também elevados coeficientes de determinação, para ambos os casos.

Autores como Triantafilis (2000) e Yao et al. (2007) destacam a importância de se realizar calibrações locais e de se desenvolver modelos específicos visto que práticas agrícolas, e heterogeneidades físicas podem influenciar na distribuição de sais no perfil. Como o local de estudo apresenta solo heterogêneo, a validação local pode fornecer informações mais precisas, devido às características qualitativas e quantitativas dos atributos físicos e químicos distribuídos ao longo dos perfis, principalmente em escala de lote.

Tabela 20. Coeficientes obtidos através da calibração local com β calculados para $N=9$ e $N=15$, para a camada de 0-0,30m

Vivaldo $R^2=0,86$		área 1 + área 2 $R^2=0,94$	
N=9	α	N=15	α
Intercpt	-1,17	Intercpt	1,99
EMH0	-4,32	EMH0	-2,06
EMH1	3,56	EMH1	4,83
EMV0	3,54	EMV0	-1,11
EMV1	4,47	EMV1	14,08
EMH2	-0,52	EMH2	1,04
EMV2	-4,83	EMV2	-27,58
		EMV3	14,67
		EMH3	1,49
		EMV4	-1,17
		EMH4	-0,68
		EMV5	-4,42
		EMH5	0,27

Tabela 21. Calibração local para as leituras de CEr com base em leituras do EM38 para a camada de 0-0,30m

	área 1 + área 2	Vivaldo	LN CEr	Log CEm Vivaldo	Log CEm Vivaldo + Mamona
CEr	CEm N=15	CEm N=9			
4,02	4,76	4,76	1,39	1,56	1,56
3,81	4,01	3,33	1,33	1,39	1,20
2,84	2,81	3,36	1,04	1,03	1,21
8,87	8,96	8,22	2,18	2,19	2,10
4,11	5,74	4,89	1,41	1,74	1,58
6,43	4,63	5,17	1,86	1,53	1,64
3,25	3,71	3,38	1,18	1,31	1,21
5,79	4,15	5,70	1,75	1,42	1,74
2,58	2,05	2,30	0,94	0,72	0,83

Tabela 22. Coeficientes obtidos através da calibração local com β calculados para N=9 e N=15, para a camada de 0,30-0,60m

Vivaldo $R^2=0,86$		Vivaldo + mamona $R^2=0,99$	
N=9	α	N=15	α
Intercpt	-0,85	Intercpt	3,93
EMH0	6,80	EMH0	2,64
EMH1	-6,60	EMH1	-0,11
EMV0	-12,39	EMV0	-6,89
EMV1	16,13	EMV1	15,43
EMH2	-0,35	EMH2	1,47
EMV2	-1,85	EMV2	-24,93
		EMV3	12,78
		EMH3	2,42
		EMV4	3,14
		EMH4	-2,63
		EMV5	-4,32
		EMH5	1,28

As Figuras 19 e 20 estão apresentando as comparações entre os valores estimados e medidos da condutividade elétrica, para as camadas 0-0,30m e 0,30-0,60m, respectivamente.

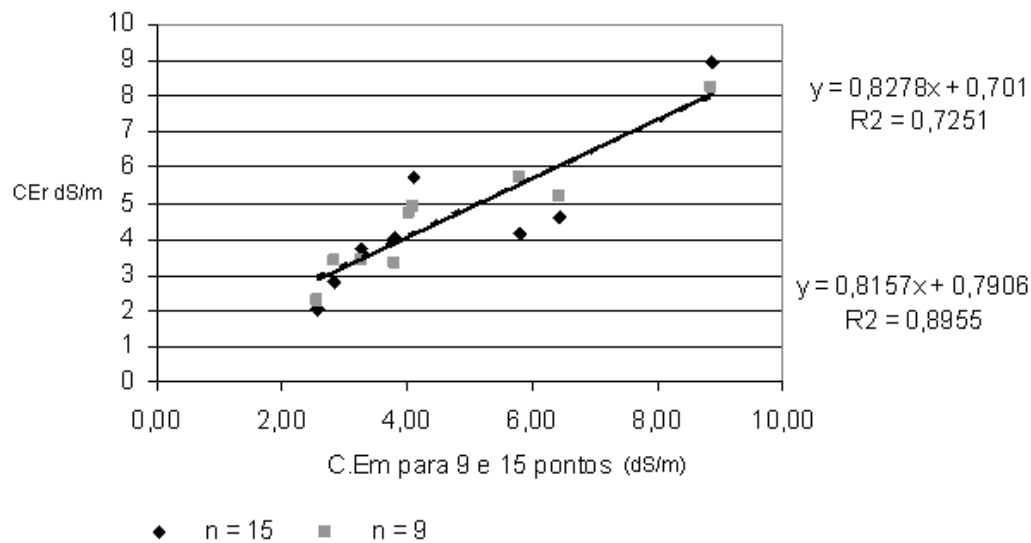


Figura 19. Desempenho de modelos locais de regressão múltipla, para estimativa da condutividade elétrica real da camada 0-0,3 m, utilizando 9 pontos e 15 pontos, através de correlação linear.

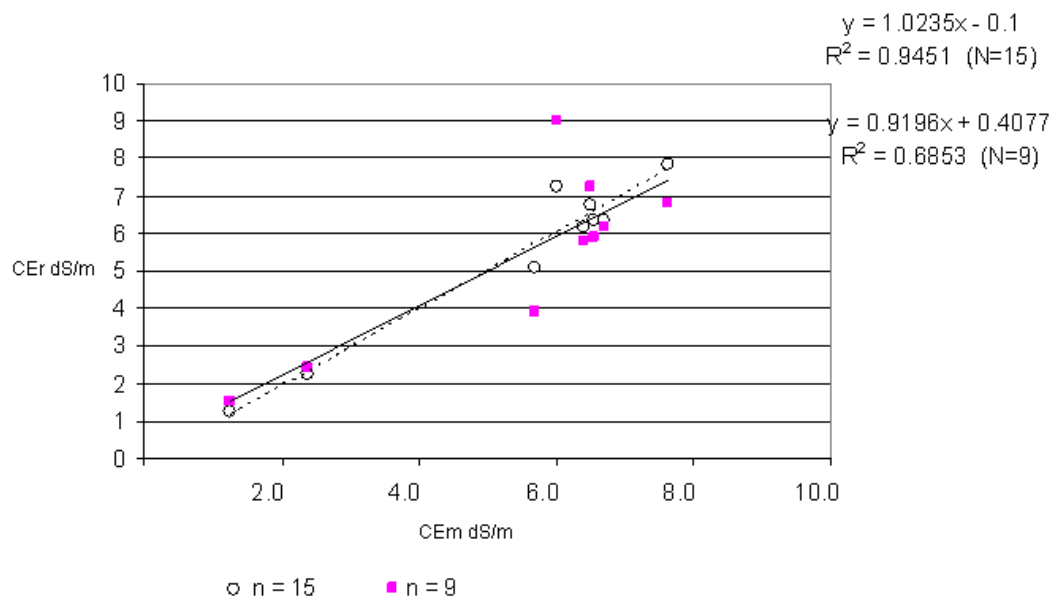


Figura 20. Desempenho de modelos locais de regressão múltipla, para estimativa da condutividade elétrica real da camada 0,30-0,60 m, utilizando 9 pontos e 15, através de correlação linear.

O método de indução eletromagnética recebe influência de heterogeneidades do perfil, sejam físicas ou químicas. Desse modo, é de se esperar que o número de níveis de medição acima do solo para posicionamento do equipamento EM38 tenha influência na incerteza das regressões múltiplas, ou seja, nos coeficientes de determinação dos modelos desenvolvidos.

Com base nas Figuras 21 e 22, pode-se observar que a utilização de um único modelo local para representar tanto na área 2 quanto na área 1, e adotando apenas 3 níveis, reduz o coeficiente de determinação do modelo. É interessante notar que, à medida que se aumenta o número de níveis, de medição ocorre um incremento no valor do coeficiente de determinação R^2 , tanto para a camada de 0-0,30m, quanto para a de 0,30-0,60m.

Verifica-se que, quando se utiliza 6 níveis de posicionamento do EM 38 acima do solo, modelos de regressão com elevado coeficiente de determinação podem ser observados, e com aplicabilidade simultânea para dois lotes distintos no vale aluvial (área 1 e área 2).



Figura 21. Evolução do coeficiente de determinação R^2 da regressão múltipla, em função do número de níveis do EM38 acima da superfície do solo, para a camada 0-0,3 m.

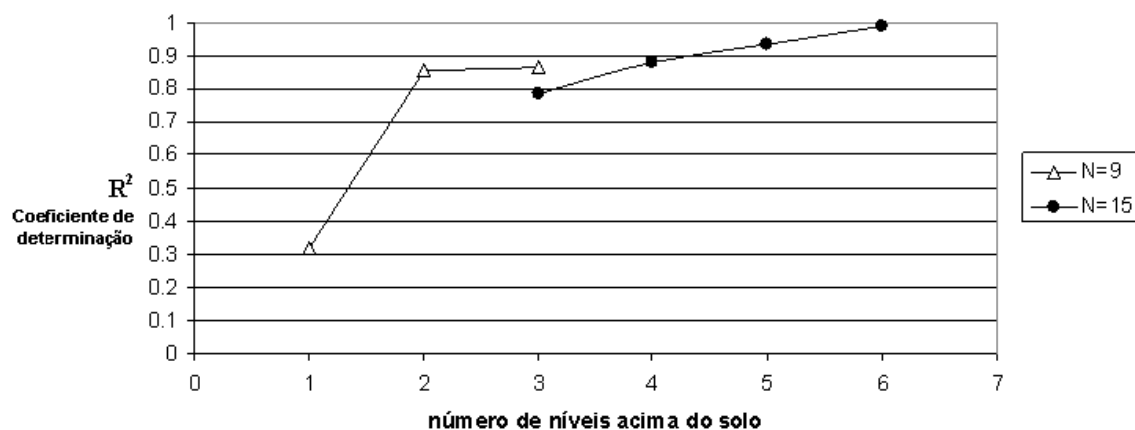


Figura 22. Evolução do coeficiente de determinação da regressão múltipla, em função do número de níveis do EM38 acima da superfície do solo, para a camada 0,3-0,6 m.

A calibração local é uma importante alternativa segundo os autores Corwin et al, (1982); Rhoades et al. (1989); Rhoades (1999); Lesch et al. (1992); Triantafilis et al. (2002). Tal afirmação é particularmente justificada na presença de elevada heterogeneidade do solo, como ocorre em área de aluvião.

4.3 Caracterização geoestatística

A Tabela 23 apresenta a estatística descritiva das estimativas de condutividade elétrica real, calculada com base nos modelos de regressão desenvolvidos. Concentrou-se na área 1 onde leituras com o EM 38 foram realizadas em 50 pontos, seguindo uma malha regular de 5x5 em uma área de 1250 m².

Na Tabela 24 utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov para avaliar a normalidade dos dados da CEr.

Tabela 23. Estatística descritiva das estimativas de condutividade elétrica real CEr na área 1

Profundidade (m)	Média	Desv. Pad.	Variância	Curtose	Coef. Var.
0-0,3	5,20	3,19	10,19	11,93	0,61
0,3-0,6	8,21	10,43	108,72	13,78	1,27
0,6-0,9	7,28	3,23	10,41	1,05	0,44

Legenda: Desv. Pad.- desvio padrão

Coef. Var. – coeficiente de variação

Tabela 24. Estatística descritiva para o teste de Kolmogorov-Smirnov, para a condutividade elétrica real estimada

Profundidade (m)	1,º				3,º		Erro	K-S (5%)
	Quartil	Mínimo	Mediana	Máximo	Quartil	ABS		
0-0,3	3,37	1,56	4,46	21,14	5,97	0,11	0,19	
0,3-0,6	3,85	0,53	5,81	56,90	8,41	0,21	0,19	
0,6-0,9	5,17	2,53	6,58	16,35	8,48	0,05	0,19	

Erro ABS = Erro absoluto

Pode-se observar, a partir das Figuras 23 e 24, que a condutividade elétrica estimada não segue uma distribuição Normal, tipicamente devido à ocorrência de valores discrepantes, conforme evidenciado nos box-plot apresentados nas Figuras 25 e 26.

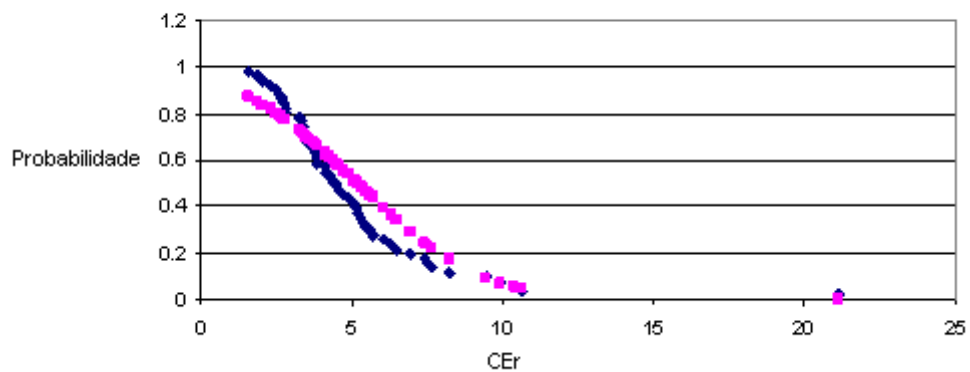


Figura 23. Análise de normalidade de condutividade elétrica real estimada, na camada 0-0,30m, na área 1.

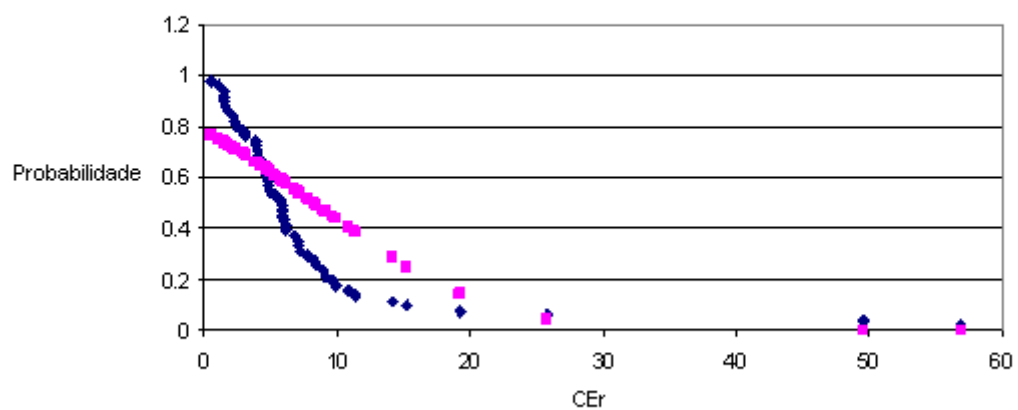


Figura 24. Análise de normalidade da condutividade elétrica real estimada, na camada de 0,30-0,60m na área 1.

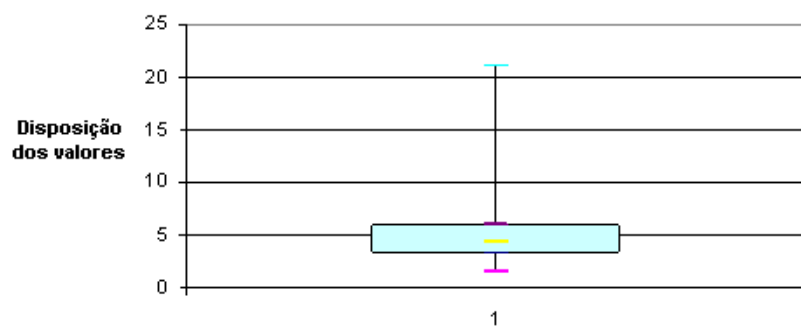


Figura 25. BOX-PLOT da condutividade elétrica real estimada, na camada 0-0,30m, na área 1.

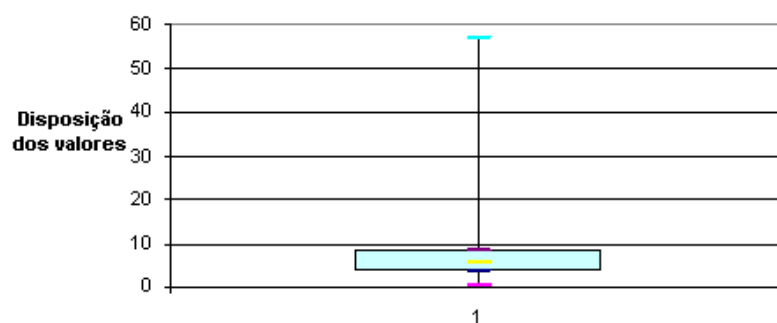


Figura 26. BOX-PLOT da condutividade elétrica real estimada, na camada 0,30-0,60m, na área 1.

Os dados de condutividade elétrica estimada foram então transformados através do logaritmo natural e assim o teste de aderência de Kolmogorov- Smirnov reaplicado. Este mesmo procedimento de transformação de dados foi utilizado por Lesch et al. (1992) e Rhoades (1999).

Tabela 25. Estatística descritiva da condutividade elétrica real estimada, na área 1, com os dados logaritmados

Profundidade (m)	Média	Desv. Pad.	Variância	Curtose	Coef. Var.
0-0,3	0,66	0,22	0,05	0,80	0,33
0,3-0,6	0,73	0,39	0,15	1,06	0,53
0,6-0,9	0,82	0,19	0,03	-0,14	0,23

Legenda: Desv. Pad.- desvio padrão

Coef. Var. – coeficiente de variação

Tabela 26. Teste de aderência à normalidade, para as condutividades elétricas reais estimadas, com os dados logaritmados

Profundidade	1º				3º		K-S (5%)
	Quartil	Mínimo	Mediana	Máximo	Quartil	Erro ABS	
0-0,3	0,53	0,19	0,65	1,33	0,78	0,04	0,19
0,3-0,6	0,59	-0,27	0,76	1,76	0,92	0,10	0,19
0,6-0,9	0,71	0,40	0,82	1,21	0,93	0,05	0,19

A normalização dos dados produzida pela aplicação do logaritmo pode também ser notada nas Figuras 27 e 28 enquanto nas Figuras 29 e 30 verifica-se que os valores discrepantes foram minimizados pela transformação.

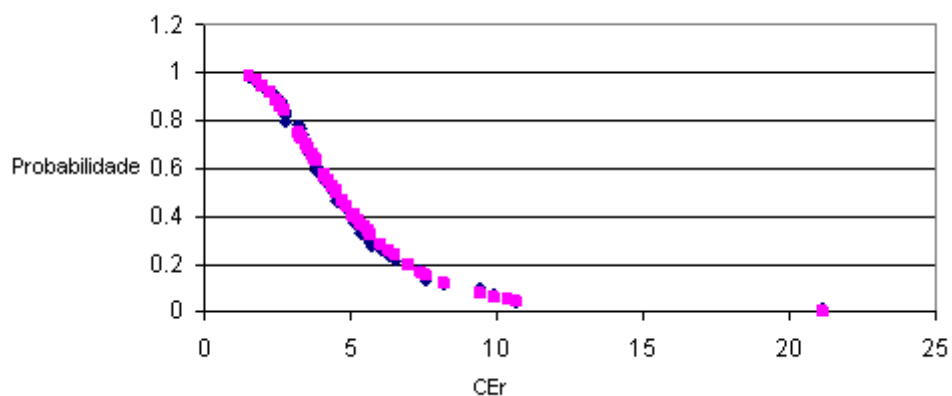


Figura 27. Teste de normalidade Kolmogorov- Smirnov do logaritmo da condutividade elétrica real, na camada 0-0,30m.

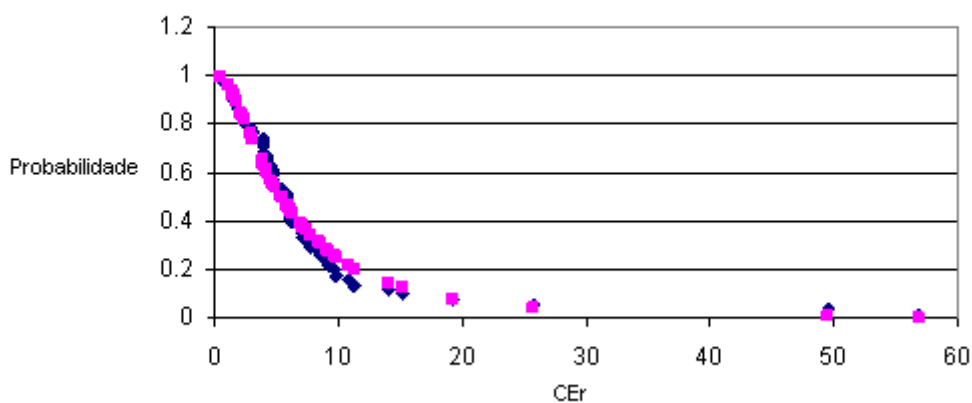


Figura 28. Teste da normalidade Kolmogorov- Smirnov do logaritmo da condutividade elétrica real, na camada 0,3-0,6m.

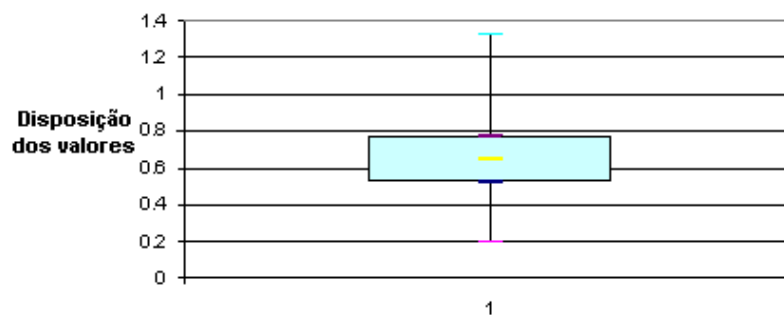


Figura 29. BOX-PLOT do logaritmo da condutividade elétrica real, na camada 0-0,30m na área 1.

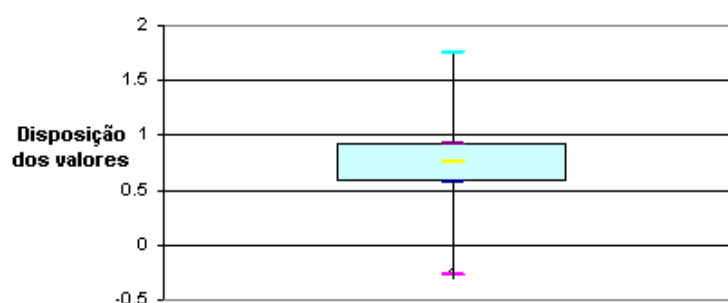


Figura 30. BOX-PLOT do logaritmo da condutividade elétrica real estimada, na camada 0,30-0,60m na área 1.

4.4 Análise geoestatística

A Tabela 27 apresenta os parâmetros de ajuste de modelos teóricos aos semivariogramas experimentais do logaritmo natural da condutividade elétrica, bem como a média e desvio-padrão dos resíduos ponderados.

Escolheu-se os modelos gaussianos por apresentarem melhor validação cruzada, pelo método de Jack-Knifing. Entretanto, nota-se na Tabela 27 que o modelo exponencial também se apresenta adequado.

As Figuras 31 e 32 apresentam os semivariograma teóricos e experimentais, bem como os mapas de krigagem da salinidade.

Tabela 27. Geoestatística dos dados logaritmados da condutividade elétrica estimada

Modelos	Efeito pepita	soleira	alcance	GDE	Validação cruzada		
					r ²	Média	Desv. Pad.
Área 1: 0 – 0,30 m							
Esférico	0,0071	0,0347	9,24	0,83	0,558	0,006	0,998
Gaussiano	0,0076	0,0343	7,65	0,819	0,564	0,006	1,006
Exponencial	0,0095	0,0329	3,76	0,776	0,531	-0,025	0,976
Área 1: 0,3 – 0,6 m							
Esférico	0,0336	0,1186	7,44	0,779	0,72	0,016	0,016
Gaussiano	0,036	0,116	6,26	0,763	0,527	0,905	0,900
Exponencial	0,0463	0,1083	3,27	0,701	0,72	-0,013	0,51

XVALID - Validação cruzada. Desp. Pad - Desvio-padrão. GDE - Grau de dependência espacial.

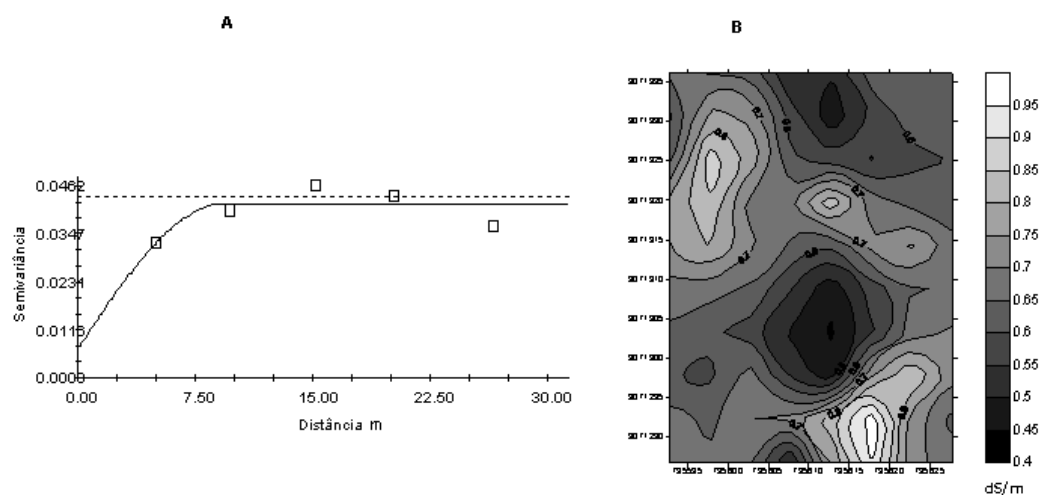


Figura 31 a e b. Semivariograma (a) e mapa de krigagem do logaritmo da condutividade elétrica estimada (b), na profundidade de 0-0,3m.

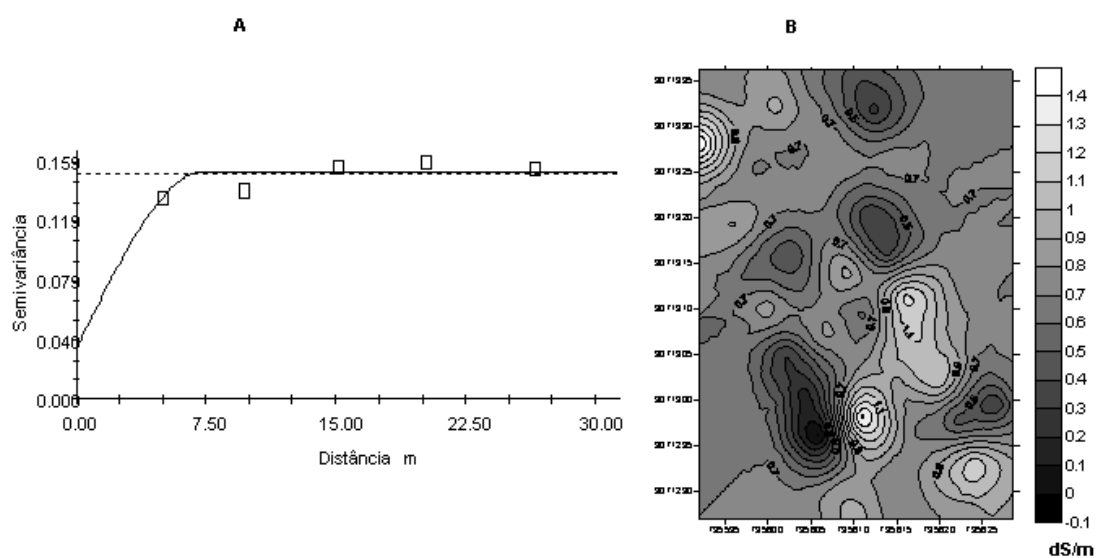


Figura 32 a e b. Semivariograma (a) e mapa de krigagem do logaritmo da condutividade elétrica estimada (b) na profundidade de 0,30-0,60m.

4.5 Mapeamento das propriedades físicas

No tocante à textura do solo, foi verificado que a distribuição das frações texturais, na camada 0,20-0,40m, segue distribuição Normal, segundo o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS), ao nível de 5% de probabilidade. Outros pesquisadores encontraram distribuição Normal para características físicas do solo, para a mesma região (Montenegro & Montenegro, 2006; Souza, 2007).

As Figuras 33 e 34 apresentam os semivariogramas teóricos e experimentais, bem como os mapas krigados de %areia e %silte, na camada 0-0,20m. Nota-se forte dependência espacial, com alcance de 40,22m e 47,17m, respectivamente, através de modelo gaussiano. A Figura 35 apresenta o mapeamento para o percentual argila, na camada 0-0,20m, observando-se moderada dependência espacial, com alcance de 24,61m, ajustado a um modelo esférico.

As Figuras 36, 37 e 38 apresentam os mapas de krigados bem como seus semivariogramas teóricos e experimentais dos percentuais das propriedades areia, silte e argila.

O modelo gaussiano foi o modelo que mais se ajustou para as três propriedades, obtendo alcances de 26,22, 16,88 e 24,61, respectivamente.

Esta variação na distribuição espacial de atributos físicos pode estar relacionada à heterogeneidade dos solos aluvionares, que sofrem influências dos desuniformes e sucessivos depósitos de materiais originados de outro pontos (Souza et al., 2000).

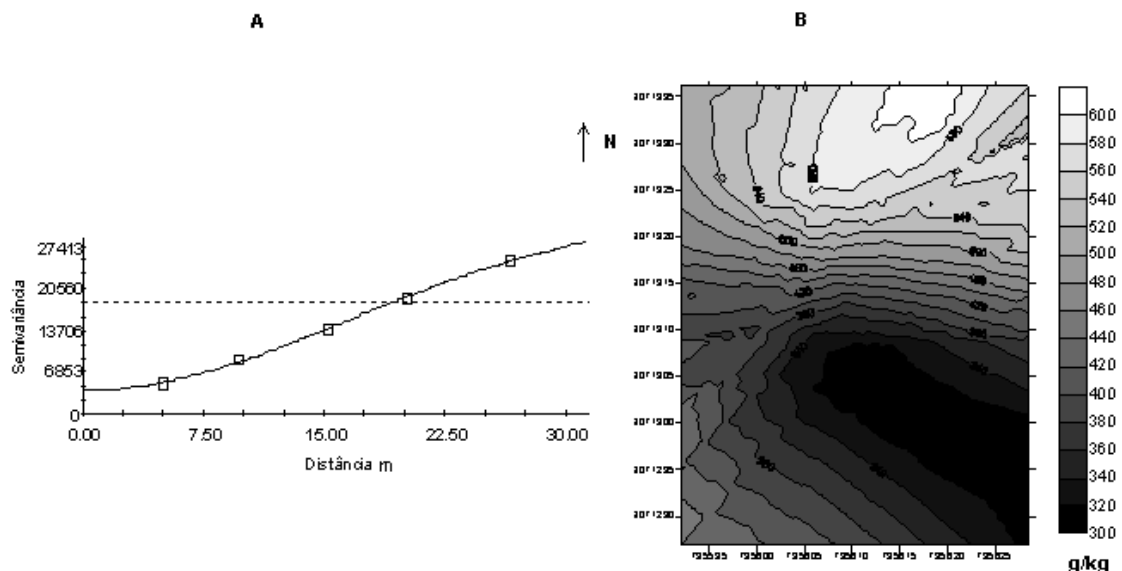


Figura 33 a e b. Semivariograma (a) e mapa de krigagem de areia (b), na profundidade de 0-0,20m, através de modelo gaussiano.

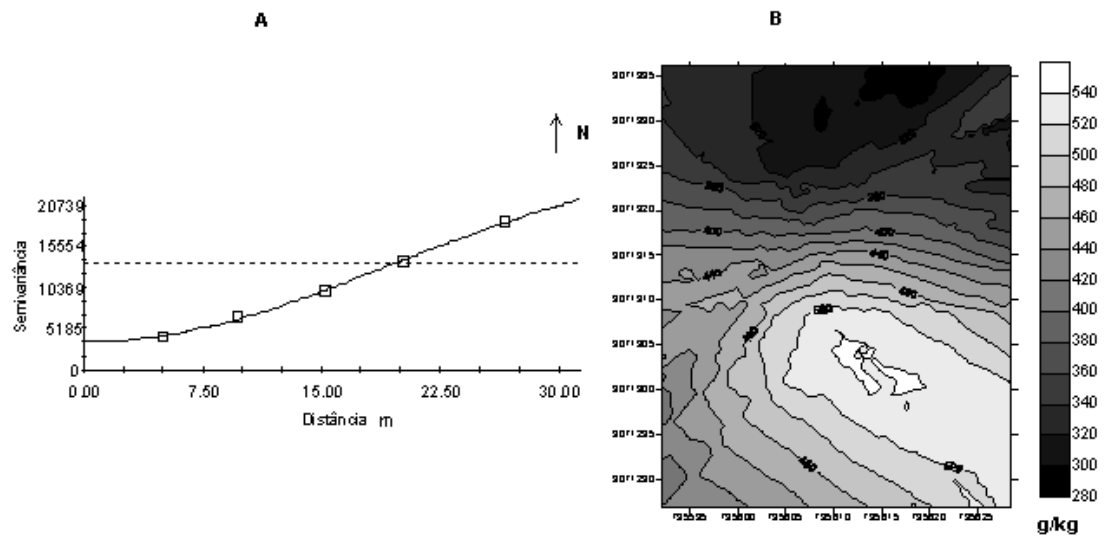


Figura 34 a e b. Semivariograma (a) e mapa de krigagem de silte (b), na profundidade de 0-0,20m, através de modelo gaussiano.

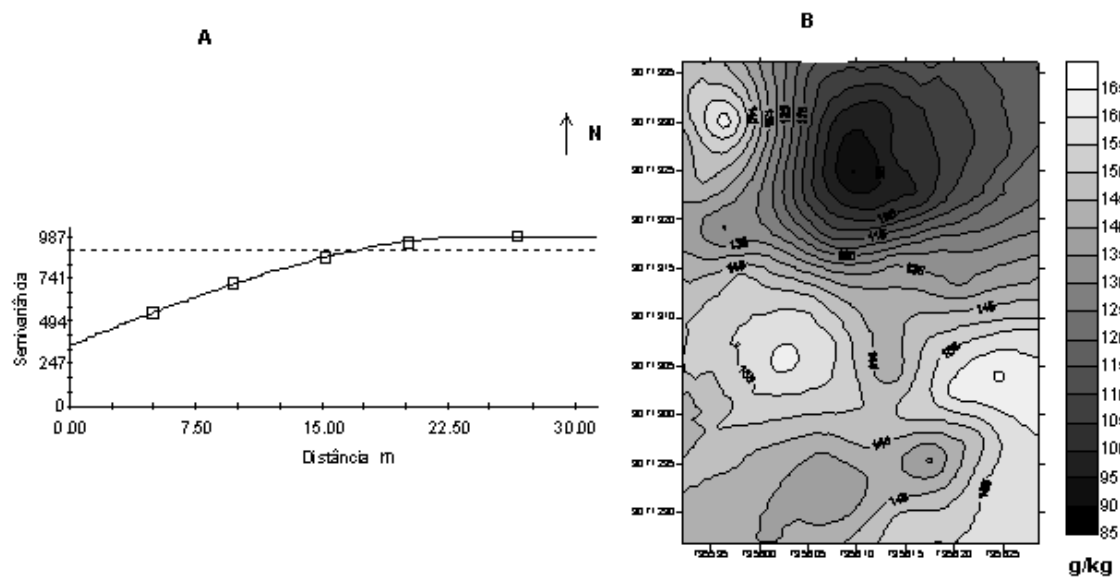


Figura 35 a e b. Semivariograma (a) e mapa de krigagem de argila na profundidade (b) de 0-0,20m, através de modelo esférico.

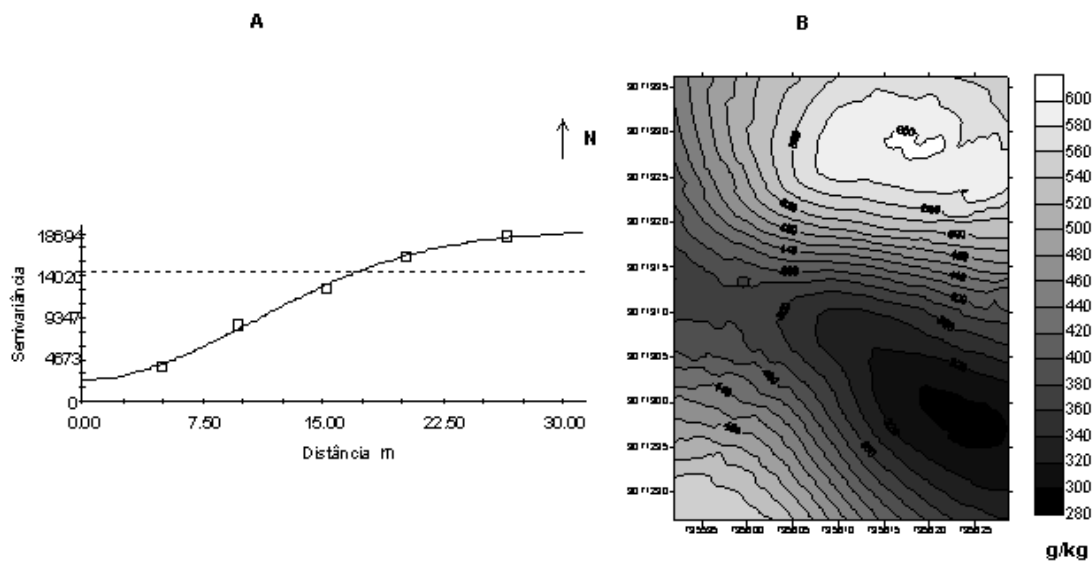


Figura 36 a e b. Semivariograma (a) e mapa de krigagem de areia (b) na profundidade de 0-0,40m, através de modelo gaussiano.

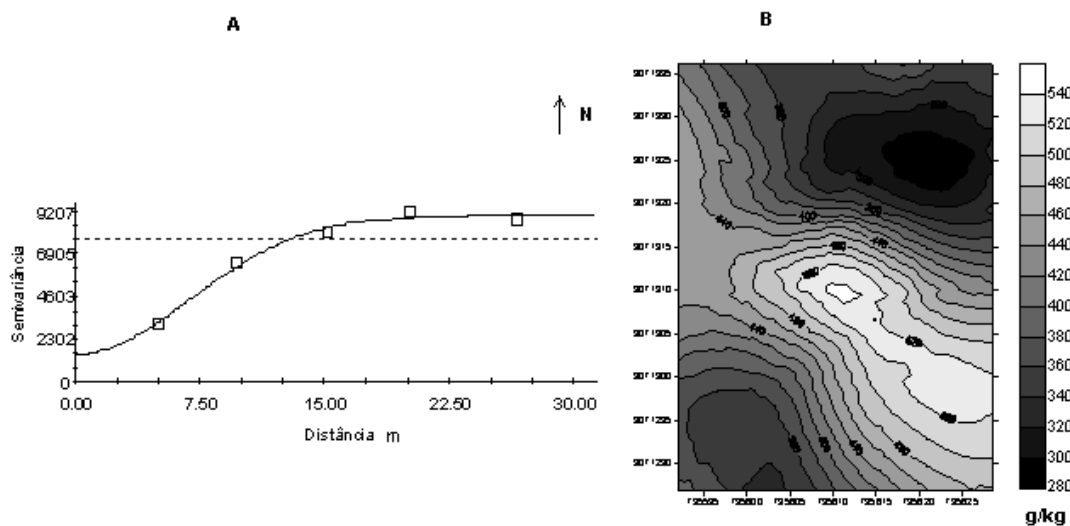


Figura 37. Semivariograma e mapa de Krigagem de silte em % , na profundidade de 0,20-0,40m, modelo gaussiano.

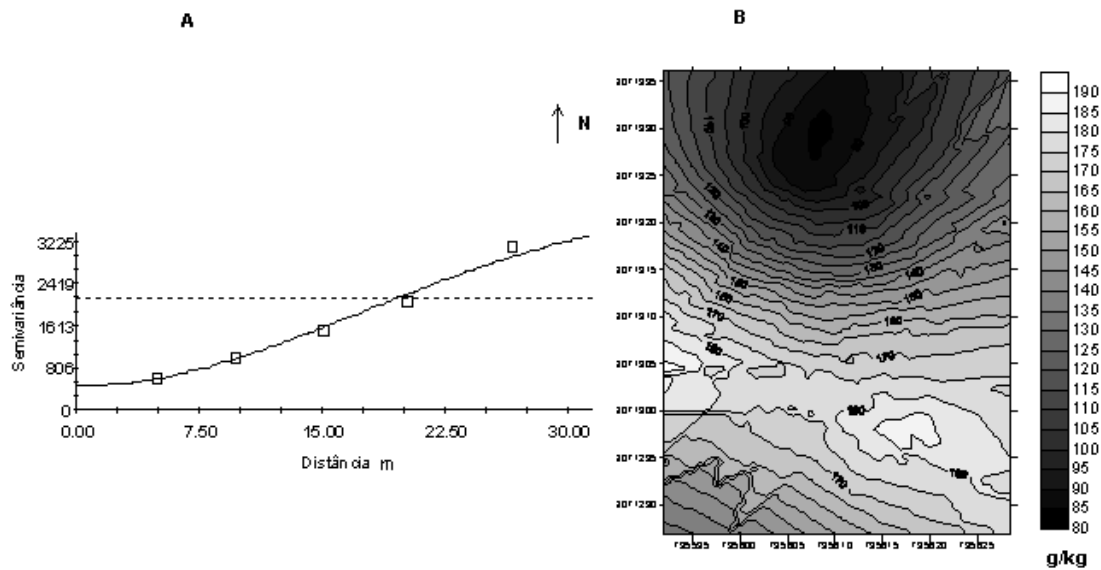


Figura 38 a e b. Semivariograma (a) e mapa de krigagem de argila (b), na profundidade de 0,20-0,40m, através de modelo gaussiano.

Observa-se um desempenho estável bem definido nas semivariâncias experimentais dos atributos físicos, permitindo assim ajustes de modelos teóricos com elevado coeficiente de determinação. De um modo geral, pode-se afirmar que há um gradual aumento no teor de areia em direção ao norte da área.

4.6 Mapeamento indicador da salinidade

Para analisar os contrastes entre áreas de maior salinidade e de menor salinidade, aplicam-se a geoestatística indicadora nos dados de condutividade elétrica estimados, adotando-se primeiramente um nível de corte de 8 dS/m.

A Tabela 28 apresenta os parâmetros para semivariograma indicador da salinidade, com nível de corte de 8 dS/m. Não foi verificada dependência espacial após análise de validação cruzada. Os semivariogramas comportam-se aproximadamente com efeito pepita puro. Desse modo, optou-se por não construir o mapa krigado associado.

Tabela 28. Parâmetros da Geoestatística Indicativa: para CER em dS/m para a camada de 0,30 – 0,60 m

Modelo	Efeito pepita	soleira	alcance	GDS	Média	Desv. Pad.
Esférico	0,03710	0,2062	5,00	0,820	-0,005	0,900
Gaussiano	0,04110	0,20620	1,29	0,801	-0,005	0,893
Exponencial	0,04870	0,20640	0,130	0,764	-0,005	0,879

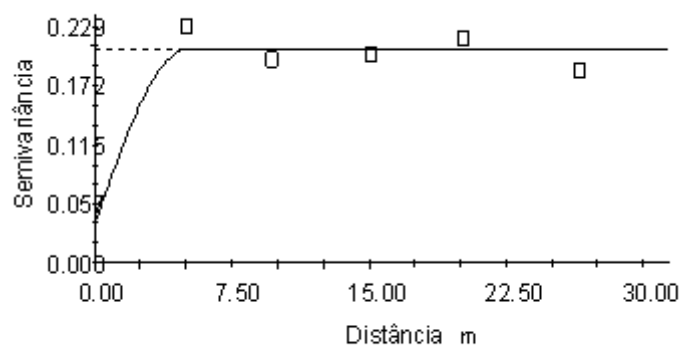


Figura 39. Semivariograma para atributo o condutividade elétrica real estimada na camada de 0,30-0,60m para o modelo esférico.

Tabela 29. Geoestatística indicadora: 0,30-0,60m

Modelo	Efeito pepita	soleira	alcance	GDS	Média	Desv. pad.
Esférico	0,04230	0,21960	5,00	0,807	-0,005	0,880
Gaussiano	0,04660	0,22020	1,40	0,788	-0,005	0,869
Exponencial	0,05470	0,22040	0,130	0,752	-0,004	0,856

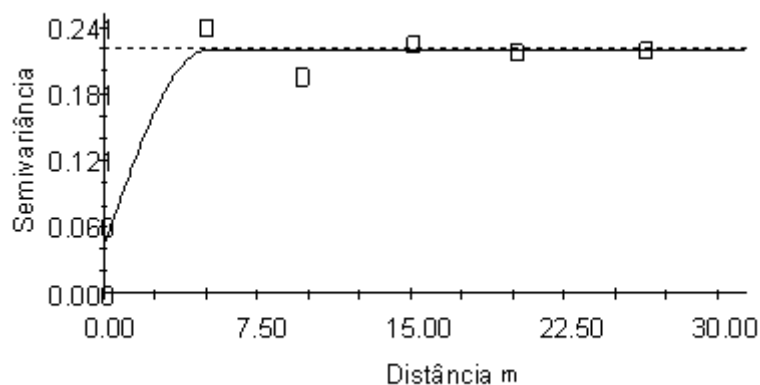


Figura 40. Semivariograma para o atributo condutividade elétrica real estimada na camada de 0,60-0,90m, para o modelo esférico.

Alterou-se, então, o nível de corte de 8dS/m para 4dS/m, de modo a investigar uma possível dependência espacial, que permitisse a construção de mapas indicadores. A Tabela 30 apresenta os parâmetros dos semivariogramas analisado, enquanto a Figura 41 apresenta o ajuste teórico e o mapa indicativo desejado.

Tabela 30. Geoestatística dos dados da condutividade elétrica estimada, admitindo cut-off igual a 4 dS/m

MODELO - GAUSSIANO				Validação cruzada			
Profundidade (m)	Efeito pepita	soleira	alcance	Média	Des Pad	R ²	GD
0-0,3	0,030	0,230	9,37	0,009	1,051	0,543	0,545
0,3-0,6	0,052	0,185	6,92	0,026	0,915	0,638	0,780
MODELO ESFÉRICO							
Profundidade (m)	Efeito pepita	soleira	alcance	Média	Desv, Pad,	r ²	GD
0-0,3	0,011	0,250	4,22	-0,042	0,796	0,445	0,959
0,3-0,6	0,070	0,174	3,84	0,044	0,787	0,799	0,714
MODELO EXPONENCIAL							
Profundidade (m)	Co	Sill	alcance	Média	Desv, Pad,	r ²	GD
0-0,3	0,026	0,2334	11,93	0,005	0,965	0,545	0,898
0,3-0,6	0,050	0,188	8,22	0,028	0,923	0,648	0,790

O critério de classificação utilizado para um nível de corte, está baseado em trabalho de Pizarro (1985) citado por Chaves et al. (2005), que classifica os solos como não salinos no intervalo de 0-4dS/m.

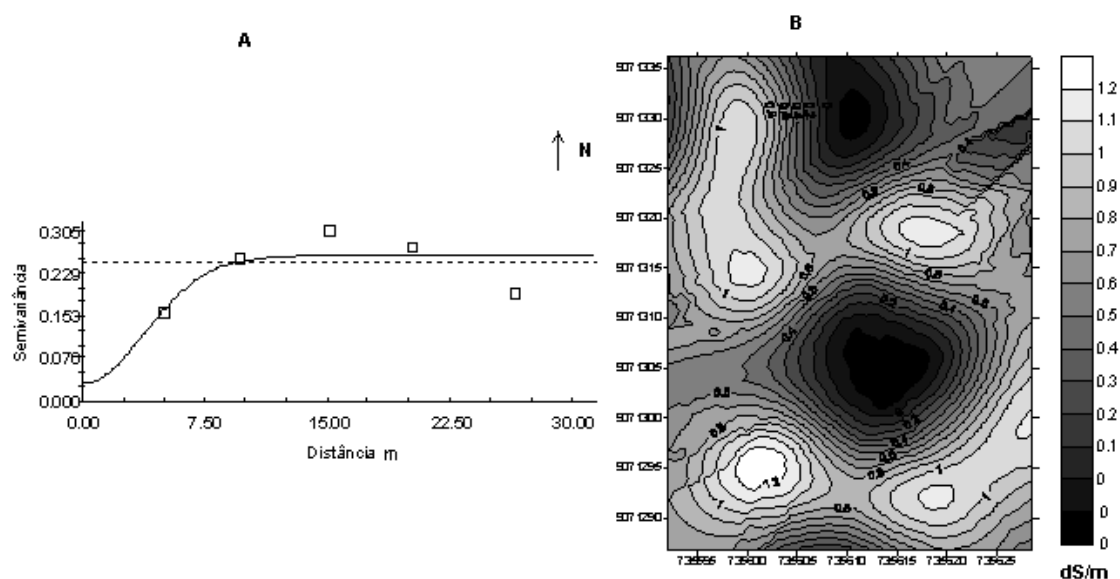


Figura 41 a e b. Semivariograma (a) e mapa de isolinhas (b) para o atributo CER, na camada de 0-0,3m, no modelo gaussiano.

Não há um valor claro de variabilidade, quando se examina o mapa de indicador da Figura 41, para a camada de 0-0,30m, possivelmente devido às sucessivas irrigações, seguidas por um período de pousio.

A Figura 42 apresenta os semivariogramas e o mapa indicador para a camada de 0,30-0,60m, podendo-se notar certa coerência em relação às duas camadas 0-0,3 e 0,3-0,6 comparando-se as zonas mais salinas (mais claras) no mapa.

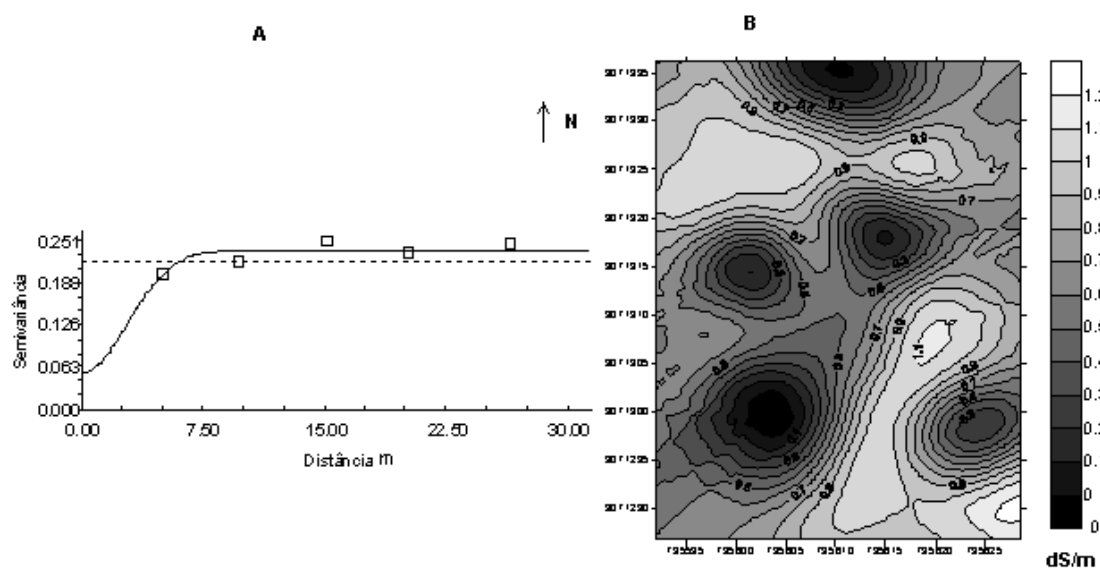


Figura 42. Semivariograma (a) e mapa de isolinhas (b) para o atributo CER na camada de 0,3-0,6m no modelo gaussiano.

O modelo que melhor se ajustou às duas profundidades foi o gaussiano de acordo com teste de validação cruzada, com alcances de 9,37m e de 6,62m, nas profundidades de 0-0,30 m e 0,30-0,60m, respectivamente.

De modo a auxiliar na discussão dos resultados da geoestatística indicadora construiu-se também os semivariogramas indicativos de textura. Na verdade, o critério para a associação dos índices 0 e 1 se baseou na classe textural das amostras. Os solos francos e franco argilosos receberam índice 1, enquanto os solos franco-arenoso receberam índice 0 (zero). A Tabela 31 apresenta os parâmetros de ajuste aos semivariogramas indicadores experimentais.

As Figuras 43, 44 e 45 apresentam os semivariogramas indicadores das classes texturais, para a camada de 0-0,20m, enquanto as Figuras 46, 47 e 48 apresentam as informações para a camada 0,20-0,40m.

Tabela 31. Geoestatística dos dados de propriedades físicas

Profundidade (m)	XVALID						GD
	Efeito pepita	soleira	alcance	Média	Desv. Pad.	R²	
MODELO GAUSSIANO							
0-0,2	0,0888	0,2728	45,90	0,002	1,066	0,992	0,754
0,2-0,4	0,048	0,270	29,89	0,020	1,042	1	0,822
MODELO EXPONENCIAL							
0-0,2	0,0340	0,486	44,35	0,005	0,806	0,974	0,935
0,2-0,4	0,001	0,4420	31,94	0,005	0,644	1	0,998
MODELO ESFÉRICO							
0-0,2	0,0476	0,3026	53,50	0,006	1,112	0,982	0,864
0,2-0,4	0,0068	0,277	36,00	0,016	1,088	0,999	0,975

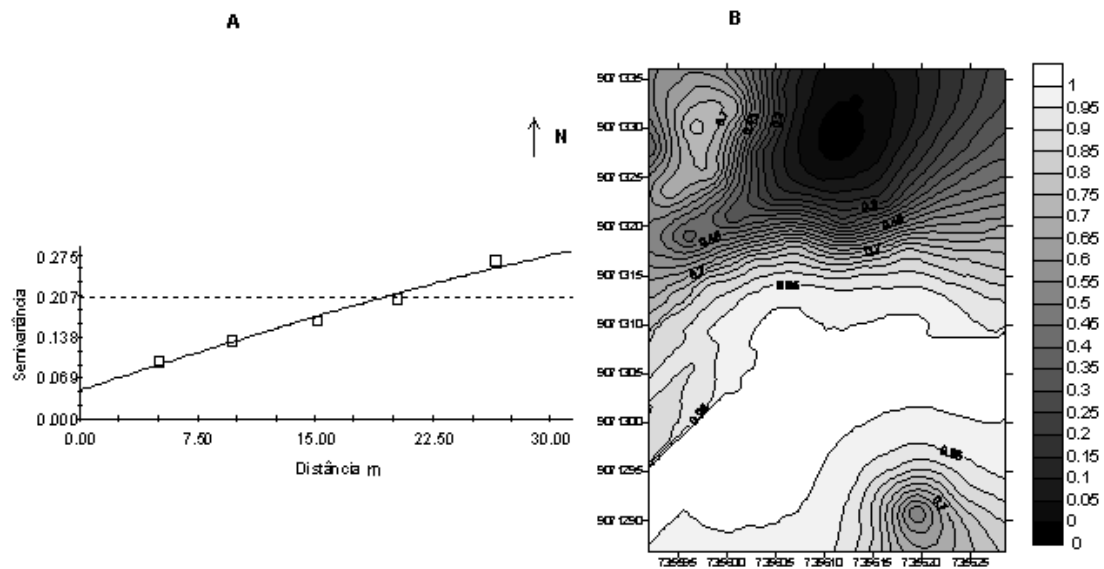


Figura 43 a e b. Semivariograma esférico indicador (a) e mapa associado, para as classes de solo (b) na profundidade de 0-0,20m.

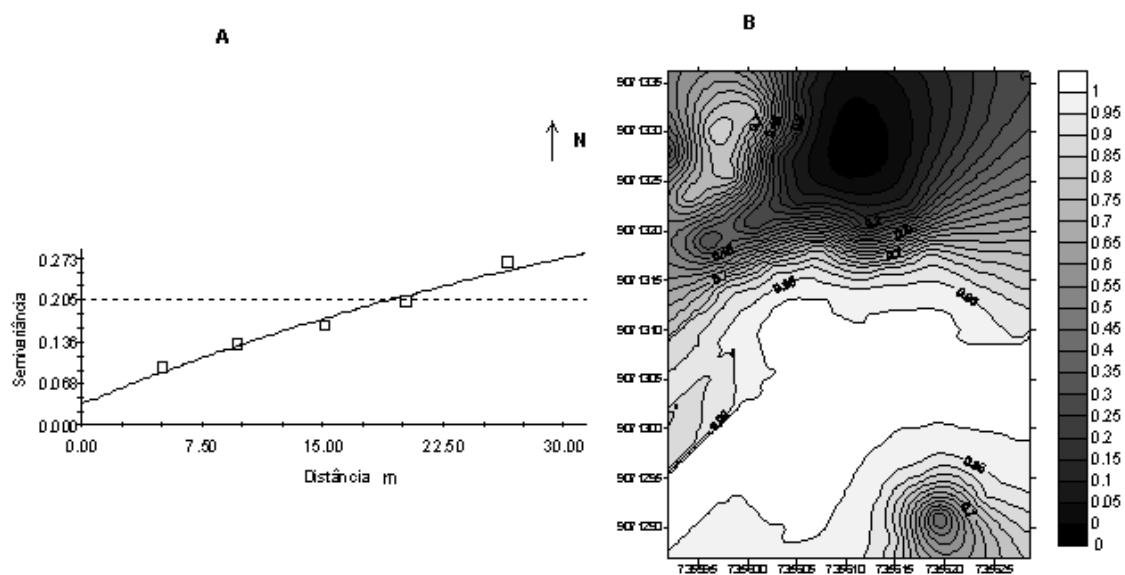


Figura 44 a e b. Semivariograma exponencial indicador (a) e mapa associado, para a classe e solo (b) na profundidade de 0-0,20m.

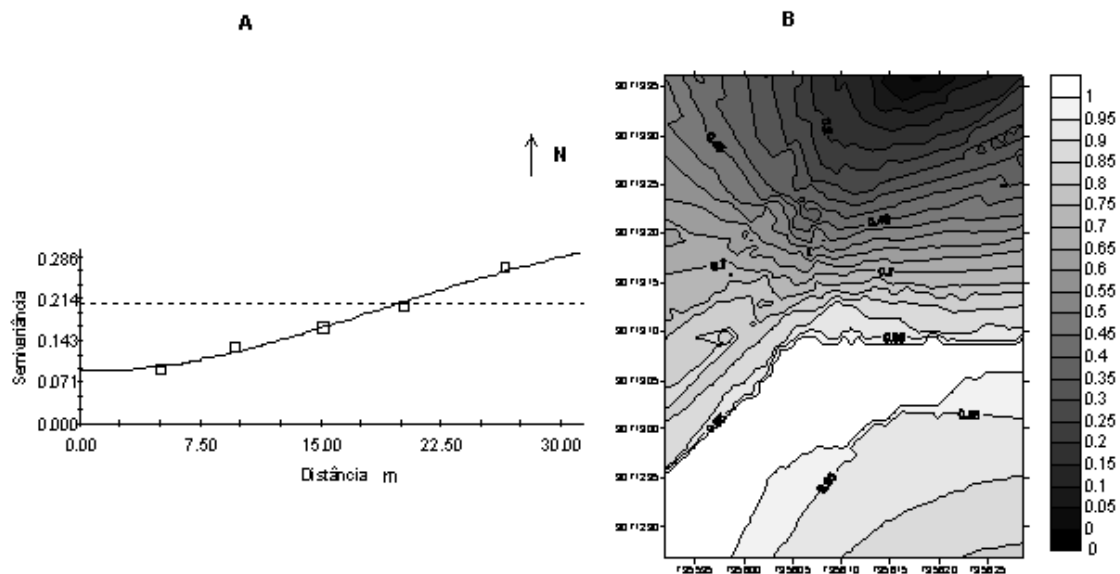


Figura 45 a e b. Semivariograma gaussiano indicador (a) e mapa associado, para as classes de solo (b) na profundidade 0-0,20m.

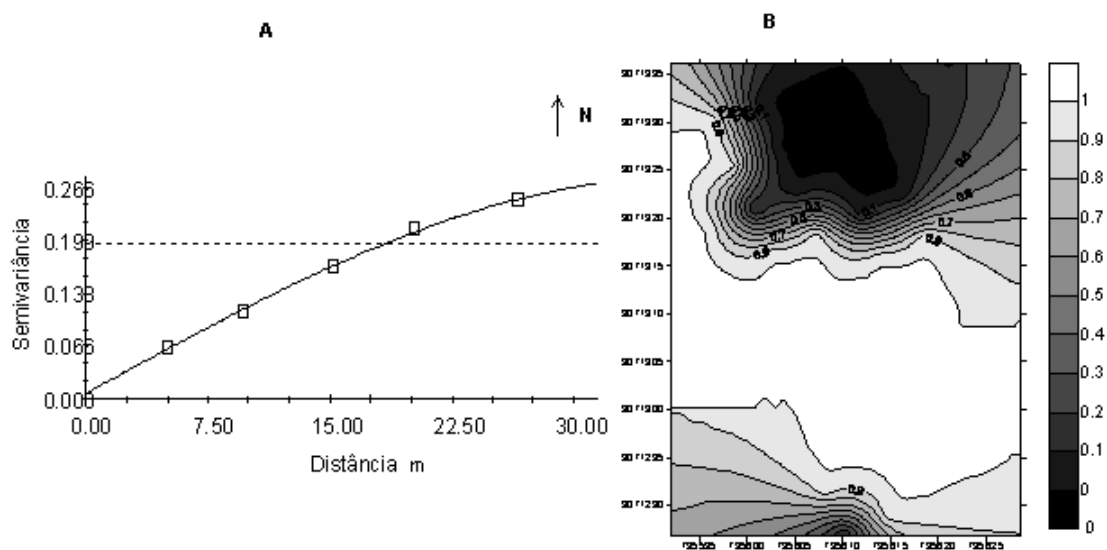


Figura 46 a e b. Semivariograma esférico indicador (a) e mapa associado, para as classes de solo (b) na profundidade de 0,20-0,40m.

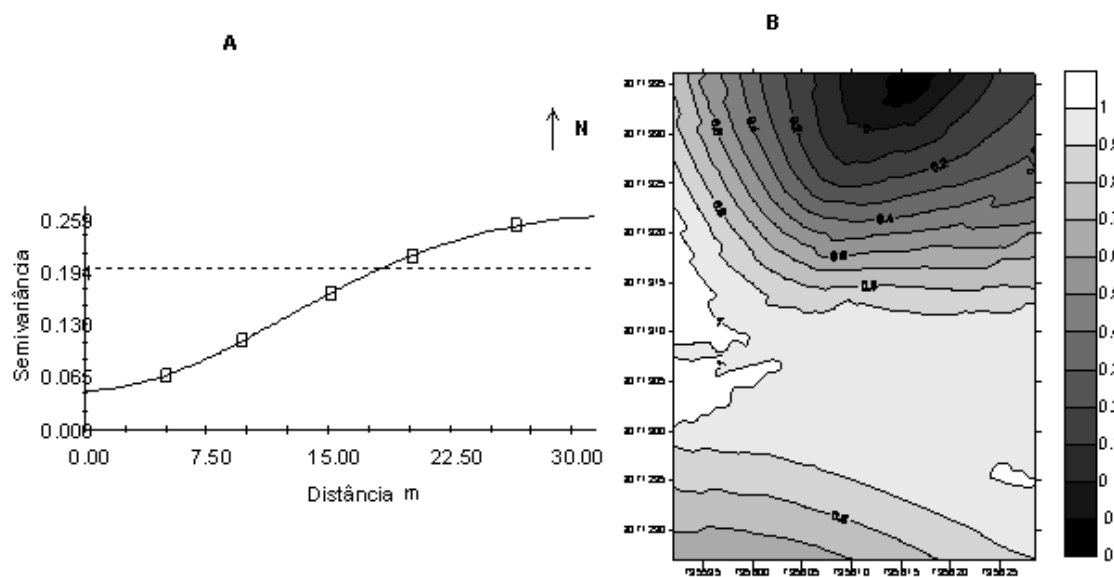


Figura 47 a e b. Semivariograma gaussiano indicador (a) e mapa associado para as classes de solo (b) na profundidade 0,20-0,40m.

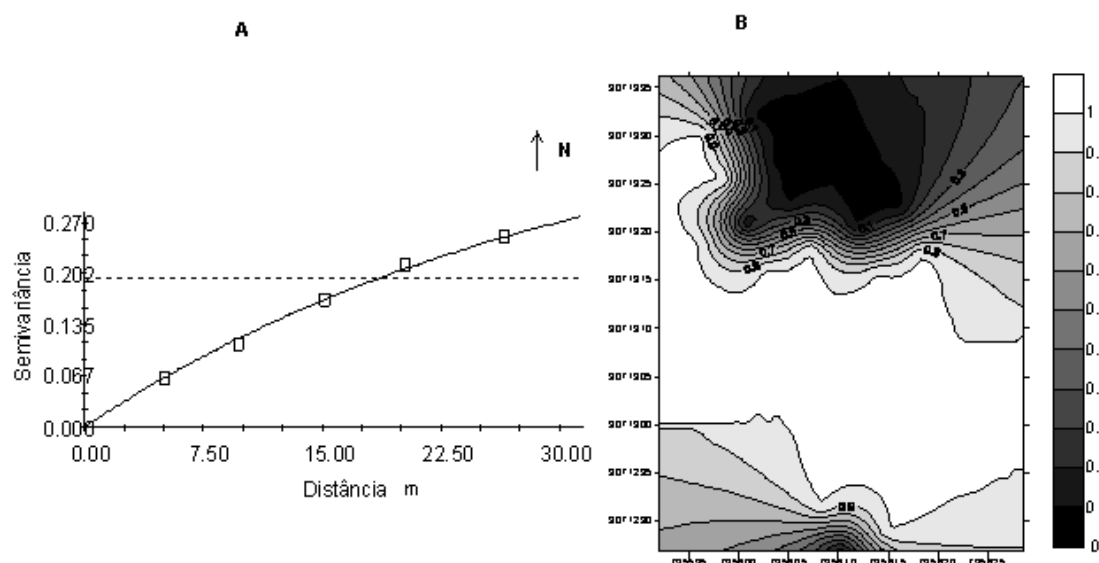


Figura 48 a e b. Semivariograma exponencial indicador (a) e mapa associado para as classes de solo (b) na profundidade 0,20-0,40m.

Montenegro & Montenegro (2006) observaram em trabalhos no local de estudo que os solos são predominantemente de textura franca. Esta mesma afirmação foi efetuada por Souza. (2007), em trabalhos na mesma área. Os dados do presente trabalho passaram pelo teste de Kolgomorov-Smirnov, que indicou normalidade dos dados ao nível de 5% de significância.

Na camada 0-0,20m, o modelo que mais se ajustou foi o gaussiano; contudo, na camada de 0,20-0,40m, o modelo esférico foi o que mais se ajustou, segundo o critério de Jack-Knifing (Vauclin et al., 1983).

A geoestatística indicadora apresentou uma variação no alcance para as camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40m, o que pode ser justificado aplicando-se o conceito de gênese do solo, em que o maior tempo relativo de exposição dos horizontes superficiais condiciona sua maior taxa de intemperismo (Buol et al. 1997).

5.0 CONCLUSÕES

1. Dentre os modelos de calibração da literatura, o de Rhoades et al. (1999) mostrou-se o mais adequado para estimar a condutividade elétrica do solo em larga escala no vale aluvial do riacho Mimoso;
2. A correlação entre os dados observados de condutividade elétrica real e os estimados com as equações de calibração do EM 38 apresentou elevado coeficiente de determinação, superior a 0,7 para profundidades até 0,6 metros;
3. Modelos locais de regressão linear múltipla puderam ser obtidos para a área em estudo, com coeficientes de determinação superiores aos das equações disponíveis na literatura, o que vem reforçar a necessidade de calibrações locais;
4. Os valores de condutividade elétrica obtida através do EM38 apresentaram dependência espacial nas profundidades de 0-0,30 e 0,30-0,60m; na área “1” apresentaram melhor ajuste ao modelo gaussiano;
5. A utilização da geoestatística indicadora permitiu adequada identificação das áreas salinas, associando-as com as classes de solo;
6. Em geral, as manchas de solo franco tenderam a apresentar maior concentração de sais.

6.0 REFERÊNCIAS

- ABREU, G. H. F. G. de. **A função das barragens subterrâneas como obra de convivência com a seca**. 2001. 184p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2001.
- AMARO FILHO, J. **Determinação da condutividade capilar mediante método do perfil instantâneo**. 1982. 94p. Tese (Mestrado) Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 1982.
- ANTONINO, A.D.; ÂNGULO JARAMILLO, R.; SOUZA, E. S. de; MACIEL NETTO, A.; CARNEIRO, C.J.G.; MONTENEGRO, A. A. A. Determinação da condutividade hidráulica e da sorvidade de um solo com infiltrômetro a disco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5. n.2, p.247-253, 2001.
- AUDRY, P.; SUASSUNA, J. A **Salinidade das águas disponíveis para a pequena irrigação no Sertão Nordeste**: caracterização, variação e limitações de uso. Recife: CNPq, 1995. 128p.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, 1999. 218p. (FAO. Estudos de Irrigação e Drenagem, 29).
- BASTOS, D.C.O.A. **Manejo da salinidade em irrigação localizada**: análise da alternativa de lixiviação incompleta. 2004. 57p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia e Ciência do Solo, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2004.
- BERGEIJK, J. V.; GOENSE, D. SPEELMA, L. PA – Precision agriculture: soil tillage resistance as a tool to map soil type differences. **Journal of Agricultural Engineering Research** v.79, n.4, p.371-387, 2001.
- BERNARDO, S. Manejo racional da irrigação. **ITEM**, Brasília, v.36, p. 25-26, mar. 1989.
- BLACKBURN, D.M. **Efeito da drenagem subterrânea no balanço hidrossalino de um neossolo flúvico irrigado em Pesqueira, PE, Brasil**. 2002. 74p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2002.
- BORGES, G.V.L.; ALBUQUERQUE, J. do P. T.; REGO, J. C.; GÓIS, R. S. S.; VIEIRA, L. J. dos S. Avaliação da disponibilidade hídrica subterrânea do perímetro irrigado do açude público de Custódia, Município de Custódia, PE. In: **SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE**, 5., 2000, Natal, RN. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2000. p.24-31.

BRASIL. Ministério do meio ambiente. **Transposição das águas do São Francisco e Tocantins para o semi- árido nordestino**: avaliação preliminar. Brasília: MME/DNAEE-DCRH, 1983- 1985. 72p.

BROOKS, R.H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media**. Colo: University Fort Collis – Department Colorado, 1997. 194p. (Hydrology Paper, 3).

BUOL, S.W. et al. **Soil genesis and classification**. Iowa: Iowa State University, 1997. 527p.

CAMARGO, E.C.G. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos krigagem no sistema de processamento de informações georeferenciadas. (SPRING)**. São José dos Campos: Ministério da Ciência e Tecnologia-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997. p.14.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KERLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.47, p.1501-1511, 1994.

CARTER, R.C.; ALKALI, A. G. Shallow groundwater in the northeast arid zone of Nigéria. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, v.29, p.341-355, 1996.

CISAGRO - Companhia Integrada de Serviços Agropecuários. **Projeto de Irrigação da Fazenda Nossa Senhora do Rosário, Pesqueira, PE**: relatório técnico. Recife, 1989. 120p.

CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; VASCONCELOS, A.C.F.; LEÃO, A. B. Avaliação da salinidade dos neossolos dos perímetros irrigados São Gonçalo e Engenheiro Arcoverde, PB. **Revista Agropecuária Técnica**, Areia, v. 26, n. 1, p. 18-26, 2005.

CICHOTA, R.; VAN LIER, Q. J.; ROJAS, C. A. L. Variabilidade espacial da taxa de infiltração em argissolo vermelho. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.789-798, 2003.

COELHO FILHO, M.A.; GONÇALVES, A.C.A. Variabilidade espacial de variáveis físico-hídricas do solo em um pomar de lima ácida Tahiti, irrigado por microaspersão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.2, p.239-46, 2001.

COSTA, M.R. **Avaliação de reservatórios constituídos por barragens subterrâneas**. 2003. 189p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

- COSTA, W.D. Aquíferos aluviais como suporte agropecuário no Nordeste. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3., 1984, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 1984. v.1, p.431- 440.
- CORREA, M.M.; RIBEIRO, M. R. **Levantamento detalhado de solos da Fazenda Nossa Senhora do Rosário, Pesqueira, PE.** Recife: UFRPE/UFPE/CNPq/BNB, 2001, 34p.
- CRESSIE, N.A. **Statistics for spatial data.** New York: John Wiley, 1991. 900p.
- DIAS, N.S. et al. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade do solo sob ambiente protegido, utilizando-se extratores de solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.496-504, 2005.
- DOOLITTLE, J.A.; SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R.; INDORANTE, S.J. Estimating depths to claypans using electromagnetic induction methods. **Journal of Soil Water Conservation**, Ankenny, v.49, n 6, p.572-575, 1994.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements.** Rome: FAO, 1977. 179p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).
- EGUCHI, E.S.; SILVA, E. L.; OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.242–246, 2002.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo.** Rio de Janeiro, 1997.
- ENGLUND, E.; SPARKS, A. **Geostatistical environmental assessment software - geoEAS, Version 1.2.1.** Las Vegas: U. S. Environmental Protency Agency, 1990.
- FREIRE, M.G.B. dos S.; RUIZ, H. A.; RIBEIRO, M. R.; FERREIRA, P. A.; ALVAREZ V., V. H.; FREIRE, F. J. Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água da irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, p.45-52, 2003.
- FILIZOLA, H.F.; SANS, L.M.A.; FERRACINI, V.L. Parâmetros hídricos do solo como auxiliares na avaliação da poluição da água superficial e subsuperficial (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Anais** Rio de Janeiro: SBCS/CNPS, 1997.

FREEZE, R.A. Henry darcy and the fountains of dijon. **Ground Water**, v.32, n.1, p.23-30, 1994.

GEONICS LIMITED. **EM 38 ground conductivity meter operating manual** . Ontario, 1999. 69p.

GHASSEMI, F.; JAKEMAN, A. J.; NIX, H.A. Human induced salinization and the use of quantitative methods. *Environment International*, Amsterdam, v.17, n.3, p.581-594, 1991.

GONÇALVES, A.C.A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo de irrigação**. 1997. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M. V. Correlação espacial entre retenção de água e textura do solo, para fins de manejo de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.22, n.3, p.296-303, 2002.

GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V. Aplicação de ferramentas geoestatísticas para análise de variáveis regionalizadas em agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 2004. v.1. p.1-20.

GOOVAERTS, P. Study of spatial relationships between two sets of variables using multivariate geostatistics. **Geoderma**, Amsterdam, v.62, p.93-107, 1994.

HARGREAVES, G.H. **Climatic zoning for agricultural production in northeast Brazil**. Logan: Utah State University, 1974. 6p.

HEATH, J.; CHALLIS, P.; NORMAN, C. **Manual for calibration of EM38**. Victoria: Natural Resources & Environment- Institute of Sustainable Irrigated Agriculture, 1999. 9p.

HOPKINS, D.G.; RICHARDSON, J. L. Detecting a salinity plume in an unconfined sandy aquifer and assessing secondary soil salinization using electromagnetic induction technique. North Dakota: **Hidrogeology Journal** , North Dakota, v.7, **Falta as páginas do artigo**, 1999.

HORNEY, R.D.; TAYLOR , B.; MUNK, D. S.; ROBERTS, B.A.; LESCH, M.; PLANT, R. E. Development of practical site-specific management methods for reclaiming salt-affected soil. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.46, p.379–397, 2005.

JABRO, J.D.; STEVENS, B. W.; EVANS, R. G. Spatial relationship among soil physical properties in a grass-alfalfa hay field. **Soil Science**, Baltimore, v.10, n.9, p.719-727, 2006.

JOHNSON, N.M. Characterization of alluvial hydrostratigraphy with indicator semivariograms, **Water Resources Research**, Washington, v.31, n.12, p.3217-3227, 1995.

JOHNSON, N.M.; DREISS, S.J. Hydrostratigraphic interpretation using indicator geostatistics. **Water Resources Research**, Washington, v.25, n.12, p.2501-2510, 1989.

JOHNSTON, M.A.; SAVAGE, M. J.; MOOLMAN, J. H.; DU PLESSIS, H. M. Evaluation of calibration methods for interpreting soil salinity from electromagnetic induction measurements. **Soil Science American Journal**, v. 61, p.1627-1633, 1997.

JOHNSTON, M.A. **An evaluation of the four-electrode and electromagnetic induction techniques of soil salinity measurement**. South Africa, 1994. 191p. (Water Research Commission Report, 269).

JONES, A.J.; WAGENET, R.J. In situ estimation of hydraulic conductivity using simplified methods. **Water Resources Research**, Washington, v.20, n.11, p. 1620-1626, 1984.

JONG VAN LIER, Q.; LIBARDI, P.L. Variabilidade dos parâmetros da relação entre condutividade hidráulica e umidade do solo determinada pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.1005-1014, 1999.

JOURNEL, A.G. Nonparametric estimation of spatial distributions. **Mathematical Geology**, Columbia, v.15, n.3, p.445-468, 1983.

KACHANOSKI, R.G.; DE JONG, E.; VAN WESENBEECK, I.J. Field scale patterns of soil water storage from non-contacting measurements of bulk electrical conductivity. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v.70, p.537-541, 1990.

LANDIM, P.M.B.; STURARO, J. R.; MONTEIRO, R. C. **Exemplos de Aplicação de co-krigagem**. Campus de Rio Claro: UNESP-Departamento de Geologia Aplicada/ IGCE, 2002. (UNESP. Texto Didático, 09).

LEMOES, R.C. de; SANTOS, R. D. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3.ed. Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo /Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1996. 83p.

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.

LESCH, S.M.; RHOADES, J.D.; LUND, L.J.; CORWIN, D.L. Mapping soil salinity using calibrated electromagnetic measurements. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p. 540-548, 1992.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2.ed. Piracicaba, 2000. 509p.

LIN, H.S.; MCINNES, K.J.; WILDING, L.P.; HALLMARK, C.T. Effects of soil morphology on hydraulic properties: I. Quantification of soil morphology. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, p.948-954, 1999.

LI, H.T.; LI, X. M.; PHILIP, B.; LI, W. P.; HAO, A. B. Application of electromagnetic method to soil salinization assessment. **Hydrogeology and Engineering Geology**, v.3, p. 95-98, 2006.

LOVELL, C.J.; BATCHELOR, C. H.; SEMPLE, A.J.; MURATA, M.; MAZHANGARA, E.; BROWN, M. **Development of small- scale irrigation using limited groundwater resources**. Wallingford, UK: Institute of Hydrology, 1992. 127p. (Third Interim Report). L

LYLE, S. **Application of electromagnetic techniques to investigate castor beans potential in alluvial valleys of Pernambuco State**. 2007. 127p. Dissertação (Mestrado em Earth And Environmental Sciences) - University of Birmingham, Birmingham, 2007.

LUND, E.D.; COLIN, P. E.; CHRISTY, D.; DRUMMOND, P. E. Applying soil electrical conductivity technology to precision agriculture. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 2001, Montpellier. **Anais...** Montpellier: Ecole Nationale Supérieure Agronomique, 2001. p.1089-1100.

LUNDGREN, W.J.C. **Uso da co-krigagem na caracterização da variabilidade espacial da condutividade hidráulica**. 2004. 87p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Biometria, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2004.

McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. V. Coregionalization and multiple sampling strategy. **Journal of Soil Science**, v.34, p.137-162, 1983.

McNEILL, J.D. **Electrical terrain conductivity measurements at low induction numbers**. GEONICS, 1980. 221p. (GEONICS. Technical Notes TN-6).

MELLO, G.; BUENO, C. R. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.2, p.294-305, 2006.

MONTEIRO, A.L.N. **Avaliação de lavagem incompleta de sais em Neossolo Flúvico utilizando modelagem computacional**. 2007. 103p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia e Ciência do Solo, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2007.

MONTENEGRO, A.A. de A.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; LEAL, I.G.; NASCIMENTO, J.J. do; ARAÚJO, T.C. Análise da recarga de origem pluviométrica e sua relação com a salinidade da água de aquífero aluvial no semi-árido do Nordeste brasileiro. In: SIMPÓSIO RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 6., 2002, Maceió-AL. **Anais...** Porto Alegre, RS: ABRH, 2002.

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**, Campina Grande, v.10, n.1, p.30–37, 2006.

MONTENEGRO, S.M.G.L.; MONTENEGRO, A.A.A.; MACKAY, R. Caracterização da variabilidade espacial de parâmetros hidráulicos em solos aluviais irrigados. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto alegre, v.4, n.2, p.3-20, 1999.

MONTENEGRO, S.M.G.L.; MONTENEGRO, A.A.A.; RIBEIRO, M.R.; CORREA, M.M.; ALMEIDA, T. A.; LINS, F.V. Análise da variabilidade espacial da salinidade em área irrigada e do nível d' água em aluvião sob uso agrícola na região semi-árida do Nordeste Brasileiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14., 2001, Aracaju, SE. **Anais...** Porto Alegre, RS: ABRH, 2001.

MONTENEGRO, S.M.G.L.; SILVA, K.C.M.; MONTENEGRO, A.A.A. Avaliação do manejo da irrigação por microaspersão da cultura do repolho em região semi-árida. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 7., 2004, São Luís. **Anais...** São Luís: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2004. 1 CD-ROM.

NADLER, A.; FREENKEL, H. Determination of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity measurements by the four electrode method. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.44, n.5, p.1216-1221, 1980.

OLIVEIRA, L.B.; RIBEIRO, M.R.; JACOMINE, P.K.T.; RODRIGUES, J.J.V.; MARQUES, F.A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.315-323, 2002.

OLIVEIRA, L.F.C.; SARVASI, F.C. Determinação da curva de retenção de umidade de um Latossolo Vermelho-Escuro da Região de Alfenas por tensiometria. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 21, n. 1, 1997.

PESSOA, A.L. **Uma abordagem bayesiana para estudo estatístico e geoestatístico de estimativas de salinidade do solo utilizando sensor indução eletromagnética**. 2006. 98p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Biometria, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2006.

QUEIROZ, J.E.; MENDONÇA, I.C. de; SANTOS, R.V. Um estudo comparativo entre dois procedimentos de cálculo da condutividade hidráulica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.1, p.113-115, 1997.

RADCLIFFE, D.E.; RADCLIFFE, D.E.; RASMUSSEN, T.C. Soil water movement. In: SUMMER, M.E. **Handbook of soil science**. New York: CRC Press, 2000. Cap.4, p.87-127.

RAGAB, R.; COOPER, J. D. **Obtaining soil hydraulic properties from field, laboratory and predictive methods**. Wallingford: Institute of Hydrology, 1990. 83p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Manole, 2004. 478p.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity conductivity- pressure head relationships. **Ground Water Monit. Rev**, v.6, p.84-95, 1986.

RHOADES, J.D.; CORWIN, D.L. Determining soil electrical conductivity – Depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.35, p. 54-60, 1981.

RHOADES, J. D.; SHOUSE, P. J.; ALVES, W. L.; MANTEGHI, N.A.; LESCH, S. M. Determining soil salinity from soil electrical conductivity using different models and estimayes. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.54, p.46-54, 1990.

RHOADES, J. D.; CHANDUVI, F.; LESCH, S. **Soil salinity assessment methods and interpretation of electrical conductivity measurements**. Rome, Italy: FAO, 1999. 153p. (FAO. Irrigation and Drainage, 57).

RHOADES, J. D.; LESCH, S. M.; SHOUSE, P. J.; ALVES, W. J. New calibrations for cetermining soil electrical conductivity-depth relations from electromagnetic measurements. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.53, p.74-79, 1989.

RHOADES, J.D.; CORWIN, D.L. Determining soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.45, p.255-260, 1991.

RIBEIRO JUNIOR, P. J. Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo. 1995. 99p. Dissertação (Mestrado) — Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 1995.

RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P.K.T.; FERREIRA, M.G.V.X.; RODRIGUES, J.J.V.; LIMA, J.F.W.F. **Caracterização e classificação de solos de referencia do Estado de Pernambuco: relatório do projeto integrado CNPq/Facepe**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1999.

RIBEIRO, M.R.; FREIRE, F.J.; MONTENEGRO, A.A.A. Solos holomórficos no Brasil: Ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M de; LOPES, A.S.; ALVAREZ V., V.H. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v.3, Cap.4, p.165-208.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity conductivity- pressure head relationships. **Ground Water Monit. Rev.** v.6,p. 84-95, 1986.

ROBERTSON, G.P. **Geostatistics for the environmental sciences - GS+ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152p.

RICHARDS, L. A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington: United States Salinity Laboratory, 1951. (USDA. Agriculture Handbook, 60).

RITJEMA, P. E. **Soil moisture forecasting**. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1969. 28p. (ILRI. Nota, 513).

ROCHA, G. C.; LIBARDI, P. L.; CARVALHO, L. A.; CRUZ, A. C. R.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Variabilidade espaço temporal de propriedades físico-hídricas. In: ROCHA, G.C. et al. **Solo e água: aspectos de uso e manejo com ênfase no semi-árido nordestino**. Fortaleza: Departamento de Ciências do solo, UFC, 2004.

SANTOS, F.X. **Lisímetro de pesagem hidráulica e evapotranspiração de referência por diferentes métodos no agreste pernambucano**. 2004. 77p. Dissertação (Mestrado em Agronomia e Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2004.

SLAVICH, P. G. Determining soil depth profiles from electromagnetic induction measurements. **Australian Journal Soil Research**, v.28, p.443-452, 1990.

SILVA, P.C.M.; CHAVES, L. H. G. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em Alissolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.3, p.431-436, 2001.

SILVA, S.M.P. da. A distribuição espacial das reservas subterrâneas do Nordeste e a transposição do São Francisco. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 5., 2000, Natal, RN. **Anais...** Natal, RN: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2000. 1 CD ROM.

STATSOFT. **Statistica**: data analysis software system; version 6. [S. L.], 2001.

SOUZA, E.R. **Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um neossolo flúvico cultivado com cenoura irrigada com água moderadamente salina**. 2007, 84p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2007.

SOUZA, L.C.; QUEIROZ, J.E.; GHEYI, H.R. Variabilidade espacial da salinidade de um solo aluvial no Semi-Árido Paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4 n.1, Faltam as páginas do artigo, 2000.

SONG, C.C.; YAN, B. X.; SONG, X. S. The electromagnetism technology application in the sodium-saline **Soil.Scientia Gwgraphica Sinica**, v.22, n.1, p.91-95, 2000.

SUDDUTH, H, K.A.; KITCHEN, N.R.; HUGHES, D.F.; DRUMMOND, S.T. Electromagnetic induction sensing as an indicator of productivity on claypan soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE-SPECIFIC MANAGEMENT FOR AGRICULTURAL SYSTEMS, 2., 1995, Madison. **Proceedings...** Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1995. p. 671-681.

TOMSELLA, J.; HODNETT, M, G. Estimating unsaturated hydraulic conductivity of Brazilian soil using water retention data. **Soil Science**, Baltimore, v.162, n.10, p.235-274, 1992.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia, ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS/ABRH, 2000. 943p.

TRANTAFILLIS, J.; LASLETT, G.M.; MCBRATNEY, A.B. Calibrating an electromagnetic induction instrument to measure salinity in soil under irrigated cotton. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.64, p.1009-1017, 2000.

TRIANAFILLIS, J.; ODEH, I.O.A.; MCBRATNEY, A.B. Rive geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.65, p.869-878. 2001.

TRIANAFILLIS, J.; AHMED, M.F.; ODEH, I.O.A. Application of a mobile electromagnetic sensing system (MESS) to assess cause and management of soil salinitization in an irrigated cotton-growing field. **Soil Use and Management**, Falta o local, v.18, p.330-339, 2002.

USDA. Natural Resources Conservation Service. 1998. Soil Quality Information Sheet, 1998. Disponível em: < <http://soils.usda.gov/sqi/publications/files/avwater.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2007.

VAN GENUCHTEN, M. **The determining transport parameters for solute displacement experiments**: research report, USA Salinity Laboratory. Riverside, California: University of California, 1980. 37p.

VAN HOORN, J. W.; VAN ALPHEN, J. G. Salinity control. 2.ed. In: RITZEMA, H.P. (Eds.). **Drainage principles and applications**. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1994. Cap.15, p.533-600. (ILRI. Publication, 16).

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; VAUCHAUD, G.; NIELSEN, D. R. The use of cokriging with limited field soil observations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, n.1, p.175-184, 1983.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: VIEIRA, S.R. **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v.1, 54p.

WEBSTER, R. ; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. Statistical **methods in soil and land resource survey**. Oxford: Oxford University Press, 1990. 316p.

WOLLENHAUPT, N. C.; RICHARDSON, J.L.; FOSS, J.E.; DOLL, E.C. A rapid method for estimating weighted soil salinity from apparent soil electrical conductivity measured with an above ground electromagnetic induction meter. **Canadian Journal Soil Science**, v. 66. p.315-321, 1986.

YAO, R. J.; YANG, J. S.; LIU, G. M. Calibration of soil electromagnetic conductivity in inverted salinity profiles with an integration method. *Pedosphere*, v.17, n.2, p.246-256, 2007.

ZHANG, R. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disc infiltrometer. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.61, p.1024-1030, 1997.

ZIMBACK, C. R. L. **Grupo de estudos e pesquisas agrárias georreferenciadas, geoestatística**. Botucatu: Universidade Estadual Paulista-Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2003. p.25.