

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**DESENVOLVIMENTO DE SENSOR ELÉTRICO DE CONTATO  
E CORRELAÇÕES COM ATRIBUTOS DO SOLO VISANDO À  
AGRICULTURA DE PRECISÃO**

**VICTOR GEORGE CELINSKI**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP  
Setembro - 2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**DESENVOLVIMENTO DE SENSOR ELÉTRICO DE CONTATO  
E CORRELAÇÕES COM ATRIBUTOS DO SOLO VISANDO À  
AGRICULTURA DE PRECISÃO**

**VICTOR GEORGE CELINSKI**

**ORIENTADORA: Profa. Dra. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP  
Setembro – 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Celinski, Victor George, 1958-  
C392d      Desenvolvimento de sensor elétrico de contato e correlações com atributos do solo visando à agricultura de precisão / Victor George Celinski. - Botucatu : [s.n.], 2008.  
            xiii, 121 f. : il. color., gráfs., tabs.  
  
            Tese (Doutorado) -Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2008  
            Orientador: Célia Regina Lopes Zimback  
            Inclui bibliografia.  
  
1. Geoestatística. 2. Agricultura de precisão. 3. Instrumentos de medição. 4. Detectores. 5. Mapeamento do solo. I. Zimback, Célia Regina Lopes. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

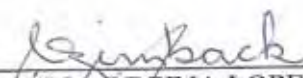
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS**  
**CAMPUS DE BOTUCATU**  
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO: "DESENVOLVIMENTO DE SENSOR ELÉTRICO DE CONTATO E  
CORRELAÇÕES COM ATRIBUTOS DO SOLO VISANDO À  
AGRICULTURA DE PRECISÃO"

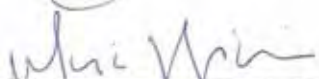
ALUNO: VITOR GEORGE CELINSKI

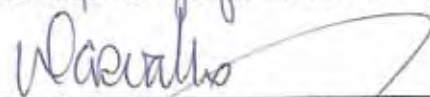
ORIENTADOR: PROFA. DRA. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

Aprovado pela Comissão Examinadora

  
\_\_\_\_\_  
PROFA. DRA. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. SÉRGIO LAZARO DE LIMA

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. MARCO ANTONIO M. BIAGGIONI

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. MOREL DE PASSOS E CARVALHO

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. IVO MARIO MATHIAS

Data da Realização: 10 de setembro de 2008.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, criador do universo, pelo dom da vida e por tudo.

Aos meus amados pais, Vitoldo e Savina, pelo amor, exemplo de vida, por toda ajuda que me ofereceram e por tudo o que fizeram e ainda fazem por mim e pela minha família.

Aos tesouros da minha vida, minha amada e querida esposa Tatiana, meus amados e lindos filhos, Camila, Giovana e Diogo, pelo amor, compreensão, paciência e estímulo.

Aos meus queridos sogros David e Maria Estela por toda ajuda que me ofereceram e por tudo o que fizeram e ainda fazem por mim e pela minha família.

Ao grande amigo Prof. Dr. Ivo Mário Mathias, responsável pela minha participação no Projeto de Qualificação Interinstitucional.

A minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dra. Célia Regina Lopes Zimback pela confiança, amizade, apoio, compreensão, competência e por compartilhar seus conhecimentos.

Aos professores Elias José Simon, José Matheus Yalenti Perosa, Maristela Simões do Carmo, Osmar de Carvalho Bueno, Odivaldo José Seraphim, Sérgio Campos, Sérgio Hugo Benez, Sergio Lázaro de Lima, Jorge de Lucas Junior, Luiz Antonio Targa e Carlos Roberto Padovani, pelas experiências e ensinamentos transmitidos.

Ao Engenheiro Leandro M. Gimenez coordenador de Mecanização Agrícola da Fundação ABC, pela atenção e contribuição para realização do estudo.

Ao grande amigo Marcelo Ferrasa, pela ajuda, companheirismo, apoio e convivência familiar.

Aos amigos do Departamento de Informática, Alaine Margarete Guimarães, Ariangelo Hauer Dias, Frederico Guilherme de P. F. Ielo e Leila Issa Rickli pela ajuda, apoio e incentivo.

Ao Prof. Dr. Marcos Vinicius Ribas Milleo e toda equipe da Fazenda Escola Capão da Onça, pela atenção, estímulo e apoio.

Ao Prof. Dr. Eduardo Fávero Caíres e toda equipe do Laboratório de Análises do Solo, pelo auxílio, atenção e apoio.

Aos amigos do Departamento de Engenharia Civil Prof. Alceu Gomes de Andrade Filho e Prof. Nadim Bachour Salloum, e, ao Prof. Jesuan Henrique Rupel, Chefe do Departamento de Química pela ajuda, estímulo e apoio.

Aos técnicos e funcionários do Departamento de Recursos Naturais e Ciência do Solo e do Departamento de Gestão e Tecnologia Agroindustrial, em especial, Mario Eduardo Bianconi Baldini, pela atenção, ajuda e estímulo.

Aos Coordenadores do Programa de Qualificação Interinstitucional FCA/UNESP/UEPG, Prof. Dr. Ângelo Catâneo e Prof. Dr. Jorim Souza das Virgens Filho pela atenção e apoio.

A toda equipe da Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação da UEPG, em especial a Márcia Belinsky, pela ajuda, cordialidade e pronto atendimento.

A toda equipe da secretaria da Pós-graduação da FCA/UNESP, pela ajuda, cordialidade e pronto atendimento.

A todos os amigos e colegas da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pelo incentivo e apoio.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

**AGRADEÇO.**

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABELAS .....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
1 RESUMO .....	1
2 SUMMARY .....	3
3 INTRODUÇÃO .....	5
4 REVISÃO DE LITERATURA .....	7
4.1 Agricultura de precisão .....	7
4.2 Sistema de posicionamento geográfico - GPS .....	11
4.3 Geoestatística .....	12
4.4 Variabilidade espacial dos atributos do solo .....	16
4.5 Medidas elétricas do solo .....	17
4.6 Sensores de medidas elétricas do solo.....	22
4.7 Métodos para medições elétricas do solo.....	25
4.7.1 Método laboratorial de avaliação da condutividade elétrica do solo .....	26
4.7.2 Método do contato direto no solo.....	28
4.7.3 Método da indução magnética.....	31
4.7.4 Método das propriedades dielétricas .....	31
4.7.4.1 Reflectometria no domínio do tempo – (TDR) .....	31
4.7.4.2 Capacitância elétrica .....	33
5 MATERIAL E MÉTODOS .....	36
5.1 Área de estudo.....	36
5.2 Materiais e equipamentos.....	36
5.2.1 Materiais.....	36
5.2.2 Equipamentos.....	37
5.2.3 Programas computacionais.....	37
5.2.4 Montagem do sensor de medidas elétricas .....	37

5.3 Métodos .....	39
5.3.1 Seleção dos pontos de amostragem .....	39
5.3.2 Medidas elétricas do solo .....	39
5.3.3 Resistência elétrica do solo .....	39
5.3.4 Capacitância elétrica do solo .....	40
5.3.5 Amostragem do solo .....	40
5.4 Análise dos dados .....	42
5.4.1 Análise exploratória .....	43
5.4.2 Análise de correlação entre variáveis .....	43
5.4.3 Análise geoestatística .....	43
5.5 Geração dos mapas .....	45
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	46
6.1 Sensor de medidas elétricas .....	46
6.2 Análise exploratória dos dados .....	47
6.3 Análise de correlação entre as variáveis .....	48
6.3.1 Análise de correlação linear de Pearson .....	48
6.3.2 Análise de regressão dos dados .....	52
6.3.3 Análise comparativa dos coeficientes de correlação .....	54
6.3.4 Análise dos coeficientes de determinação e dispersão dos dados .....	59
6.3.5 Análise de correlação entre os valores amostrados em campo e os valores estimados .....	69
6.4 Análise geoestatística dos dados .....	70
6.5 Mapas de superfície .....	88
7 CONCLUSÕES .....	106
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	108

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1.</b> Exemplo de um variograma experimental, modelo teórico.....	14
<b>Figura 2.</b> Amostra retangular para definir a resistividade elétrica.....	18
<b>Figura 3.</b> Diagrama de um sensor .....	23
<b>Figura 4.</b> Método dos quatro eletrodos .....	29
<b>Figura 5.</b> Método dos dois eletrodos para definir resistividade elétrica .....	29
<b>Figura 6.</b> Implemento de condutividade elétrica Veris 3100.....	30
<b>Figura 7.</b> Circuito de funcionamento do capacitor.....	34
<b>Figura 8.</b> Sensor de medidas elétricas.....	38
<b>Figura 9.</b> Esquema de medição da resistência elétrica do solo com ohmímetro.....	40
<b>Figura 10.</b> Ortofoto da área de estudo e localização georreferenciada das amostras.....	41
<b>Figura 11.</b> Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de umidade com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b). .....	60
<b>Figura 12.</b> Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o índice de condutividade elétrica com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).....	60
<b>Figura 13.</b> Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o índice de pH com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b). .....	61
<b>Figura 14.</b> Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de material orgânico com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b). .....	62
<b>Figura 15.</b> Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor Presina com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b). .....	62
<b>Figura 16.</b> Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de H+Al com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b). .....	63
<b>Figura 17.</b> Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de potássio com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b). .....	63
<b>Figura 18.</b> Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de cálcio com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b). .....	64

<b>Figura 19.</b> Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de magnésio com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b). .....	64
<b>Figura 20.</b> Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o índice de solução de bases com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b). .....	65
<b>Figura 21.</b> Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o índice de CTC com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b). .....	66
<b>Figura 22.</b> Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o índice de V% com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b). .....	66
<b>Figura 23.</b> Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de areia com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b). .....	67
<b>Figura 24.</b> Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de silte com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b). .....	67
<b>Figura 25.</b> Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de argila com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b). .....	68
<b>Figura 26.</b> Variogramas isotrópicos dos atributos do solo: resistência elétrica (a) e capacitância elétrica (b). .....	70
<b>Figura 27.</b> Variogramas isotrópicos dos teores de areia: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c). .....	71
<b>Figura 28.</b> Variogramas isotrópicos dos teores de argila: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c). .....	72
<b>Figura 29.</b> Variogramas isotrópicos dos teores de umidade: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c). .....	72
<b>Figura 30.</b> Variogramas isotrópicos dos teores de cálcio: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c). .....	73
<b>Figura 31.</b> Variogramas isotrópicos dos índices de condutividade elétrica: valor real (a), valores estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). .....	73
<b>Figura 32.</b> Variogramas isotrópicos dos índices de CTC: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c). .....	74
<b>Figura 33.</b> Variogramas isotrópicos dos teores de H+Al: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c). .....	74

- Figura 34.** Variogramas isotrópicos dos teores de potássio: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c) ..... 75
- Figura 35.** Variogramas isotrópicos dos teores de magnésio: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c). ..... 75
- Figura 36.** Variogramas isotrópicos dos teores de matéria orgânica: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e estimado por capacitância elétrica (c). ..... 76
- Figura 37.** Variogramas isotrópicos dos índices de pH: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c). ..... 76
- Figura 38.** Variogramas isotrópicos dos teores de Presina: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c). ..... 77
- Figura 39.** Variogramas isotrópicos dos índices de SB: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c). ..... 78
- Figura 40.** Variogramas isotrópicos dos teores de silte: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c). ..... 78
- Figura 41.** Variogramas isotrópicos dos índices de V%: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c). ..... 79
- Figura 42.** Mapas da variabilidade espacial dos níveis de resistência elétrica do solo (a) e de capacitância elétrica do solo (b). ..... 89
- Figura 43.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de Presina do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). ..... 90
- Figura 44.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de acidez potencial do solo (H+Al) real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). ..... 91
- Figura 45.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de potássio do solo (K) real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). ..... 92
- Figura 46.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de V% do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). ..... 93
- Figura 47.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de cálcio do solo (Ca) real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). ..... 94
- Figura 48.** Mapas da variabilidade espacial dos níveis de condutividade elétrica do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). ..... 95

- Figura 49.** Mapas da variabilidade espacial dos níveis de capacidade de troca de cátions do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). . 96
- Figura 50.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de magnésio (Mg) do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). ..... 97
- Figura 51.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de matéria orgânica (M.O) do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). ..... 98
- Figura 52.** Mapas da variabilidade espacial dos níveis de potencial de hidrogênio do solo (pH) real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). ..... 99
- Figura 53.** Mapas da variabilidade espacial dos níveis da soma de bases do solo (SB) real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). ..... 100
- Figura 54.** Mapas da variabilidade espacial da porcentagem dos teores de umidade do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). ... 101
- Figura 55.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de areia do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). ..... 102
- Figura 56.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de silte do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). ..... 103
- Figura 57.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de argila do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c). ..... 104

## LISTA DE TABELAS

	<b>Página</b>
<b>Tabela 1.</b> Resultados da análise exploratória dos dados. ....	47
<b>Tabela 2.</b> Resultados da análise de correlação linear de Pearson entre a resistência elétrica e os atributos do solo. ....	49
<b>Tabela 3.</b> Resultados da análise de correlação linear de Pearson entre a capacitância elétrica e os atributos do solo. ....	51
<b>Tabela 4.</b> Resultados dos coeficientes de correlação entre resistência elétrica e atributos do solo com transformação de valores e análise de regressão com a linha de tendência.....	53
<b>Tabela 5.</b> Resultados dos coeficientes de correlação entre capacitância elétrica e atributos do solo com transformação de valores e análise de regressão com a linha de tendência.....	54
<b>Tabela 6.</b> Resultados dos coeficientes de correlações entre resistência elétrica e os atributos do solo . ....	55
<b>Tabela 7.</b> Resultados dos coeficientes de correlações entre capacitância elétrica e os atributos do solo.....	57
<b>Tabela 8.</b> Resultado dos melhores coeficientes de correlações entre as medidas elétricas e os atributos do solo.....	58
<b>Tabela 9.</b> Resultados dos coeficientes de correlação ( $r$ ) e determinação ( $r^2$ ) entre valor real e valor estimado pela análise de regressão com linha de tendência sem transformação dos valores utilizando os valores de resistência elétrica do solo.....	69

<b>Tabela 10.</b> Resultados dos coeficientes de correlação ( $r$ ) e determinação ( $r^2$ ) entre valor real e valor estimado pela análise de regressão com linha de tendência sem transformação utilizando os valores de capacitância elétrica do solo.....	69
<b>Tabela 11.</b> Resultados das análises variográficas dos dados amostrados em campo. ....	80
<b>Tabela 12.</b> Resultados dos parâmetros geoestatísticos das amostragens em campo. ....	82
<b>Tabela 13.</b> Resultados das análises variográficas dos dados estimados pelos valores de resistência elétrica do solo.....	84
<b>Tabela 14.</b> Resultados dos parâmetros geoestatísticos das variáveis estimadas pelos valores de resistência elétrica do solo. ....	85
<b>Tabela 15.</b> Resultados das análises variográficas dos dados estimados pelos valores de capacitância elétrica do solo.....	86
<b>Tabela 16.</b> Resultados dos parâmetros geoestatísticos das variáveis estimadas pelos valores de capacitância elétrica do solo. ....	87

## LISTA DE SÍMBOLOS

A = área ( $m^2$ )  
C = capacitância elétrica (farad)  
Ca = cálcio ( $mmol_c.dm^{-3}$ )  
CTC = capacidade de troca de cátions ( $mmol_c.dm^{-3}$ )  
d = distância (m)  
E = diferença de potencial (volts)  
GPS = sistema de posicionamento global  
GS+ = geostatistical for environmental sciences  
H+Al = acidez potencial ( $mmol_c.dm^{-3}$ )  
I = corrente elétrica (ampere)  
K = potássio ( $mmol_c.dm^{-3}$ )  
L = comprimento (m)  
M.O. = matéria orgânica ( $g.dm^{-3}$ )  
Mg = magnésio ( $mmol_c.dm^{-3}$ )  
 $\rho$  = resistividade elétrica (ohm.m)  
pH = potencial de hidrogênio (sem unidade)  
Presina = fósforo extraído resina ( $mg.dm^{-3}$ )  
PVC = poli cloreto de vinila  
Q = carga elétrica (coulomb)  
q- = carga elétrica negativa (coulomb)  
q+ = carga elétrica positiva (coulomb)  
R = resistência elétrica (ohm)  
SB = soma de bases ( $mmol_c.dm^{-3}$ )  
SIG = sistemas de informação geográfica  
SQR = soma dos quadrados dos resíduos  
TDR = reflectometria no domínio do tempo  
US\$ = dolar  
UTM = universal transversa de mercator  
V% = porcentagem de saturação por bases (%)  
VERIS = equipamento comercial de medição de condutividade elétrica do solo por contato  
% = porcentagem

## 1 RESUMO

As medidas elétricas do solo têm sido utilizadas como variáveis que se correlacionam com atributos do solo. O presente trabalho teve como objetivos: desenvolver um sensor de medidas elétricas de contato e de baixo custo; avaliar seu desempenho em campo; e, verificar a correlação entre as leituras de resistência e capacitância elétrica com propriedades físicas (areia, silte e argila), propriedades químicas do solo (pH, M.O., Presina, H+Al, K, Ca, Mg, SB, CTC e V%) e o teor de água. A coleta dos dados foi realizada na Fazenda Capão da Onça, pertencente à Universidade Estadual de Ponta Grossa, em uma área com aproximadamente 13 hectares, totalizando 81 amostras. A distância entre os pontos de coleta das amostras não foi igual, mas a posição relativa de cada amostra foi georreferenciada. Em cada ponto amostral foi medida a resistência e a capacitância elétrica do solo. Após as leituras e a retirada do sensor, foram coletadas amostras do solo, enviadas e analisadas no laboratório da Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista. O instrumento de medida utilizado para a coleta dos dados de resistência elétrica do solo foi um multímetro analógico e, para coleta dos dados de capacitância elétrica do solo, foi um multímetro digital. Os dados foram submetidos às análises estatísticas exploratórias, assim como, às análises de correlação, regressão e geoestatística. Por meio de um programa geoestatístico foi realizado o estudo da variabilidade e da estrutura de dependência espacial, pelas funções do variograma para cada atributo do solo estudado. A partir desta análise, foram gerados os mapas de superfície de cada parâmetro do solo por meio da técnica de krigagem. A

finalidade dos mapas foi a de auxiliar na análise das correlações entre as variáveis. O sistema desenvolvido apresentou um baixo custo e foi capaz de medir as variações da resistência e capacitância elétrica do solo. As medidas de resistência e capacitância elétrica obtidas correlacionaram-se satisfatoriamente com os teores de argila e areia, e fracamente com o teor de umidade. Isto demonstrou a possibilidade de uso do sensor para verificar a textura do solo em áreas não homogêneas. As medidas de capacitância elétrica do solo obtidas pelo sensor correlacionaram-se significativamente com os atributos do solo: cálcio, magnésio, pH, SB e CTC. Estes resultados demonstraram a possibilidade de o sensor ser utilizado no controle da fertilidade do solo.

---

**Palavras-chave:** Geoestatística, agricultura de precisão, sensor de medidas elétricas.

**EVALUATION OF AN ELECTRIC MEASURE SENSOR USING CORRELATION WITH SOIL ATTRIBUTES.** Botucatu, 2008. 121 p. Tese (Doutorado em Agronomia - Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

**Author: VÍCTOR GEORGE CELINSKI**  
**Adviser: CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK**

## **2 SUMMARY**

The electrical measures of the soil have been used as variables that correlate with its characteristics. This study aimed at developing an electrical measure sensor of low cost, to evaluate its performance on the field and verify the correlation between the measurements of electrical resistance and capacitance with physical properties (sand, silt and clay) and chemical properties of soil (pH, MO, P resin, H + Al, K, Ca, Mg, SB, CTC and V%) and the moisture content. The data sampling was performed at the farm named “Capão da Onça” which belongs to the State University of Ponta Grossa. The samples collection was conducted in an area of approximately 13 hectares, totalizing 81 samples. The distance between the samples was not exactly the same, but the relative position of each sample was georeferenced. In each sampling the electrical resistance and capacitance of the soil was measured. After the sensor withdrawal, soil samples were collected and were sent to be analysed in the laboratory of the College of Agronomics Science of the Paulista State University. The measuring instrument used to collect data on electric resistance of the soil was an analog multimeter and to collect data on electric capacitance of the soil a digital multimeter was used. The data were submitted to an exploratory statistical analysis and to the analysis of correlation, regression and geostatistics. By means of geostatistics software a study of the variability and the structure of spatial dependence was done through the functions of the variogram for each soil attribute studied. From the analysis maps were generated for each

parameter of the soil surface through the kriging technique. The purpose of the maps was assisting in the analysis of the correlation between the data. The developed system presented a low cost and it was capable to measuring variation of the electrical resistance and capacitance of the soil. The obtained measures satisfactorily correlated with the levels of clay and sand, and weakly with the moisture content. This demonstrated the possibility to use a sensor to verify the soil texture in not homogeneous areas. The measures of the electrical capacitance of the soil obtained by the sensor had significantly correlated with the soil attributes: calcium, magnesium, pH, SB and CTC. These results demonstrated the possibility to use a sensor for soil fertility control.

---

**Keywords:** Geostatistics, precision farming, sensor of electric measures.

### 3 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico de sistemas eletrônicos e computacionais, a disponibilidade de sinais de satélite para indicar a posição geográfica para o uso do sistema de posicionamento global (GPS), sistemas de informação geográfica (SIG) e sistemas para aquisição de dados através de diversos tipos de sensores e equipamentos, vêm forçando a agricultura convencional, que trata áreas cultivadas como unidades homogêneas, a adotar mudanças nas práticas utilizadas. Isto porque, enquanto algumas áreas são bem uniformes, outras têm variações no tipo de solo, fertilidade e outros fatores que afetam a produção agrícola.

Como a variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo, produtividade, fertilidade, condutividade elétrica e outros atributos podem ser medidos e registrados. Desta forma o conhecimento destes dados pode ser usado para tomar decisões de plantio e aplicações químicas em cada ponto da área cultivada, e não mais pela média simples da área total.

A utilização dessas tecnologias como ferramentas de apoio aos agricultores permite determinar os tipos, a época, a quantidade e o local exato que os insumos deverão ser aplicados, visando maximizar a produção e minimizar a utilização de fontes de energia na agricultura, reduzindo assim os impactos ambientais.

Com a redução da aplicação de agrotóxicos e insumos há uma melhora na conservação do solo, diminuindo a degradação do meio ambiente. Assim, quanto mais se

utilizar destas técnicas, que juntas compõem a agricultura de precisão, haverá uma menor degradação ambiental, maior produtividade e racionalização do uso de energia na agricultura.

Poucos produtores brasileiros podem ter acesso a esse sistema de gerenciamento das lavouras, sendo o fator limitante o valor do investimento em equipamentos. No entanto, os especialistas da área advertem para o fato de que a mensuração da relação custo X benefício é bastante complexa e intuitiva, no que tange à obtenção de informações georreferenciadas.

Atualmente existe uma demanda crescente de dados georreferenciados na área agrônômica há, ainda, muitas dúvidas quanto à adoção do tipo de equipamento a ser utilizado para cada modalidade de aplicação. Podem ocorrer certos desapontamentos quando da sua utilização, pois é difícil encontrar a melhor relação custo X benefício no momento da escolha dos equipamentos de agricultura de precisão.

Visando agricultores com pouca capacidade de investimento, o sensor em estudo torna-se acessível, composto de um multímetro e um GPS (mais simples do mercado), podendo otimizar as correções dos atributos do solo, permitindo o planejamento adequado da aplicação de insumos e, assim, racionalizando o uso de energia na agricultura.

Diante destas constatações, este trabalho pretende contribuir para reduzir os problemas levantados e estimular o produtor rural a utilizar os recursos mais simples e acessíveis financeiramente da agricultura de precisão.

O presente estudo teve como objetivos projetar um sensor de medidas elétricas, avaliando seu desempenho em campo e verificando a correlação entre as leituras de resistência e capacitância elétrica com alguns atributos físicos (areia, silte e argila) e atributos químicos do solo (pH, M.O., Presina, H+Al, K, Ca, Mg, SB, CTC e V%).

## **4 REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1 Agricultura de precisão**

A uniformidade de tratamentos ignora as variações naturais e induzidas nos atributos do solo, e pode resultar em zonas com excesso e outras com falta de tratamentos, fazendo com que cresçam os problemas econômicos e ambientais associados a essa ineficaz aplicação de insumos no solo (OLIVEIRA, 2003).

Para Pincelli (2004), os elevados níveis de produtividade agrícola estão associados ao uso intenso de insumos. Diante disto, há a necessidade de se encontrar novos conceitos que permitam a sua redução e conseqüentemente os custos de produção e o impacto ambiental, além de incrementar a produção. A busca a esse novo meio de produção agrícola tem levado ao conceito de agricultura de precisão, segundo o qual o gerenciamento da atividade agrícola é feito levando-se em conta a variabilidade espacial e temporal da cultura, além das demais variáveis do processo de produção. A agricultura de precisão pode ser entendida como um conjunto de técnicas que permite o manejo diferenciado das áreas agrícolas, voltado às suas reais necessidades, pelo uso das técnicas agronômicas e a aplicação localizada de insumos. As técnicas de agricultura de precisão surgiram com a finalidade de otimizar a produção agrícola, não só reduzindo os custos como aumentando a produtividade.

Desde os primórdios do século XX, alguns pesquisadores procuravam desenvolver uma metodologia para que os produtores rurais pudessem amostrar, testar e mapear os solos, principalmente com relação à acidez (pH do solo), de forma simples e prática e que resultasse numa economia dos insumos aplicados. Devido à inexistência de equipamentos e ferramentas adequadas, os conceitos de gerenciamento localizado tiveram um ciclo muito curto e só foram viáveis em pequenas áreas, visto que as operações eram realizadas manualmente (GUERRA, 2006).

Stafford (2000) relatou que, antes da introdução da mecanização agrícola, o reduzido tamanho das áreas de plantação permitia que os agricultores aplicassem manualmente os tratamentos de variabilidade espacial. Entretanto, com a ampliação das áreas e a intensificação da mecanização agrícola, tornou-se cada vez mais difícil fazer o exame da variabilidade espacial do campo, sem um desenvolvimento revolucionário das tecnologias de agricultura de precisão.

A origem da agricultura de precisão, como é conhecida hoje, tem suas raízes na pressão por uma agricultura menos agressiva ao meio ambiente, inicialmente nos países europeus e logo em seguida nos Estados Unidos. A necessidade da dosagem de insumos que permitam maximizar a produção agrícola, sem que potenciais excedentes de fertilizantes e defensivos comprometam a qualidade, especialmente da água, foi o que impulsionou essa tecnologia (CASTRO, 2004).

Segundo Rodrigues (2002), a agricultura de precisão surgiu no contexto da atividade agrícola no final do século passado, graças ao desenvolvimento e disponibilidade de algumas tecnologias, entre as quais listam-se o sistema de posicionamento global, sensores de produtividade, técnicas de sensoriamento remoto e os sistemas de aplicações de insumos com taxas variáveis. Conseqüentemente, é uma maneira não convencional de conduzir o processo produtivo, quando as práticas agrícolas são encaradas sob a perspectiva da variabilidade espacial, em contraste com a aceitação de valores médios para o tratamento das culturas.

Camargo (2005), em seu trabalho, colocou a agricultura de precisão como um novo paradigma de gestão da produção agropecuária, que considera as variabilidades espaciais e temporais da produtividade e dos fatores de produção. A aplicação deste novo paradigma no campo resultou em um pacote tecnológico que utiliza tecnologias

como a eletrônica embarcada, as máquinas para aplicação de insumos a taxas variáveis e os receptores GPS. Dessa forma, para Menegatti (2002), esta tecnologia propõe que o tratamento localizado dos pontos do terreno poderá maximizar o uso da terra e de insumos agrícolas, aumentando a produtividade da cultura e diminuindo o custo com insumos. É uma prática que tende a diminuir a toxidez causada pelo excesso de algumas substâncias que são empregadas na produção agrícola, reduzindo assim a pressão no ambiente. A disponibilidade de informações produzidas no país a respeito deste assunto ainda é pequena e, neste contexto, é muito importante a busca por informações para a formação das bases brasileiras da agricultura de precisão, para que a tecnologia disponível seja corretamente utilizada.

Segundo Tschiedel e Ferreira (2002), a agricultura de precisão tende a se tornar cada vez mais comum nas propriedades rurais. As tecnologias hoje existentes já permitem que se tenha um grande conhecimento das variabilidades encontradas entre as diferentes áreas da propriedade, o que já proporciona a tomada de decisões com base em dados mais precisos. A agricultura de precisão necessita de um maior número possível de informações para que possa ser implementada com sucesso.

Conforme Shiratisuchi (2003), um dos questionamentos na adoção de algumas ferramentas da agricultura de precisão diz respeito ao custo de aquisição e depreciação dos equipamentos utilizados. Os equipamentos essenciais às culturas de grãos são os sensores e monitores de produtividade, utilizados na coleta de dados para a geração de mapas de produtividade durante a colheita. No Brasil, dispense-se cerca de US\$ 10.000,00 para instrumentalizar uma colheitadeira com os respectivos sensores e monitores.

A agricultura de precisão é uma atividade transformadora de insumos e energia em alimentos. Em função da crescente demanda mundial por alimentos, está ocorrendo uma evolução natural no meio rural, que passa agora a ser mais empresarial do que de subsistência, adotando novos métodos administrativos e gerenciais para a tomada decisão, baseados na informatização da atividade de produção (SALVADOR, 2002).

Leal (2002) relatou que, no Brasil, a agricultura de precisão está sendo adotada gradativamente, revolucionando o modo de gerenciamento das propriedades rurais. Por se tratar de novos conceitos, tais como mapas de produtividade, mapas de atributos de solos e mapas de aplicação localizada de insumos, urge a necessidade de se fazer pesquisas nesta área para que os mesmos sejam adotados dentro da realidade brasileira.

Para Molin et al. (2005), a agricultura de precisão preconiza que o manejo das lavouras pode ser melhor efetuado se a variabilidade espacial da produtividade e dos fatores a ela relacionados forem conhecidos. Esses fatores podem ser tratados localizadamente, ou as lavouras podem ser divididas em unidades de gerenciamento diferenciado. Além dos mapas de produtividade, outras investigações podem auxiliar na definição de unidades de gerenciamento diferenciado. Estudos com o uso da condutividade elétrica do solo têm apontado seu potencial para a mensuração de fatores como argila, conteúdo de água, capacidade de troca catiônica e teores de cálcio e magnésio trocáveis, teor de matéria orgânica, teor de sais da solução do solo, dentre outros atributos do solo.

Conforme relatou Pincelli (2004), os países mais desenvolvidos com respeito às técnicas de aplicação de agricultura de precisão vêm utilizando, há alguns anos, os conceitos de condutividade elétrica como uma ferramenta de trabalho no monitoramento de um maior número de atributos do solo como textura, umidade, salinidade, entre outras. Os sistemas de condutividade elétrica são aplicados prioritariamente como indicadores qualitativos de atributos físico-químicas do solo. Os países que desenvolveram as técnicas de mapeamento da condutividade elétrica estão utilizando comercialmente alguns sistemas na investigação da distribuição espacial dos componentes do solo e, posteriormente, na aplicação localizada de insumos. No Brasil, as linhas que envolvem a aplicação destes conceitos estão sendo realizadas de forma experimental.

Rodrigues (2002) descreveu em seu trabalho que, entre as diversas maneiras de conduzir a investigação da variabilidade, destacam-se a amostragem de solo em malha, os mapeamentos de plantas daninhas, de condutividade elétrica do solo e da compactação, o acompanhamento do desenvolvimento da cultura por sensoriamento remoto e, de forma mais difundida, o mapeamento da produtividade por ocasião da colheita. Foi verificada uma sensível dificuldade em se estabelecer um alcance de amostragem capaz de atender satisfatoriamente, ao mesmo tempo, aos requisitos técnicos e econômicos para identificar e compreender a variabilidade dos atributos de solo, aliada ao patamar de complexidade e de custos exibidos por outros meios de averiguação. A possibilidade de definição de zonas de manejo tem se mostrado, então, uma alternativa para se estabelecer uma efetiva prática de agricultura de precisão. Entre outros meios capazes de definir tais zonas, o estudo dos dados de produtividade, assim como as medidas elétricas (resistência, resistividade,

condutividade e capacitância elétrica), desponta como uma linha promissora para este esperado avanço, a fim de se obter subsídios para a melhor compreensão da variabilidade espacial e os meios de manejá-la com eficiência e economia.

Foi verificado em Molin et al. (2005), Castro (2004) e Pincelli (2004) que a condutividade elétrica do solo constitui uma ferramenta de grande potencialidade para auxiliar no aumento da produtividade, na otimização financeira e na racionalização do uso de insumos e de energia na agricultura.

#### **4.2 Sistema de posicionamento geográfico - GPS**

Desde os primórdios dos tempos o homem sentiu a necessidade de localização, fosse para saber onde estava, para marcar caminhos ou para marcar campos de caça, sendo essa tarefa, em alguns momentos, questão de sobrevivência. Vários métodos de referenciação ou de localização foram utilizados pelo homem durante a sua evolução. Utilizaram-se pedras para marcar caminhos, as estrelas para se localizar quando das grandes expedições, e ondas de rádio para auxiliar na localização e nas rotas. Lamparelli et al. (2001) destacaram que todos esses métodos não proporcionavam a localização e o desenvolvimento de rotas com segurança. Mesmo o homem moderno, com toda a sua tecnologia, demorou em desenvolver um sistema que possibilitasse a localização e a marcação de rotas com mais confiança. O que viabilizou a construção do sistema atual de posicionamento foi o desenvolvimento espacial, principalmente o relacionado aos satélites. O sistema de posicionamento atual se baseia em satélites e tem grande confiabilidade, sendo chamado de Sistema de Posicionamento Global (GPS).

Conforme relatou Coelho (2003), o uso de Sistema de Posicionamento Global representa atualmente uma nova alternativa de posicionamento para a Geodésia, a Cartografia e a Topografia, tendo o seu uso crescido significativamente em aplicações na Engenharia. A constante evolução dos equipamentos e os softwares na área de topografia propiciaram um ganho considerável em produtividade e qualidade na confecção dos mapas.

Para Cremonini (2002), quanto ao uso civil de GPS, seu emprego na agricultura vem sendo cada vez mais freqüente, permitindo a obtenção de diversas

informações que podem auxiliar no aumento da eficácia em operações agrícolas e da qualidade do gerenciamento do sistema de produção nas culturas agrícolas.

Atualmente, o uso do sistema GPS é amplamente difundido pelas técnicas de agricultura de precisão, como: acompanhamento da lavoura, mapeamento da produtividade, amostragem de solos, demarcação de áreas de ocorrência de doenças das culturas, de ataque de pragas ou de plantas daninhas (CASTRO, 2004).

Segundo Dainese et al. (2003), uma das grandes contribuições do geoprocessamento para a população, em termos de agricultura, é a de integrar os vários tipos de informações necessárias para o gerenciamento e controle da produção agrícola, e a integração de sua tecnologia com outras, a fim de fornecer um aumento desta produção quase que simultaneamente com a redução da degradação ambiental.

### **4.3 Geoestatística**

O tratamento localizado, que é o objetivo final da agricultura de precisão, não é, exclusivamente, uma consequência direta da utilização de equipamentos dotados de sensores, sistema de posicionamento e sistemas computacionais de controle de aplicação de insumos. Antes, é a integração destes e outros sistemas na geração, análise e utilização de informações que refletem a variação que pode ser tratada de forma localizada. Nesse sentido, são relevantes os recursos geoestatísticos para análise da variabilidade espacial das características físicas e químicas do solo (RODRIGUES, 2002).

Pela geoestatística podem-se estabelecer as mais diversas correlações entre as determinações de uma variável, em diversos pontos geográficos de uma mesma área de estudo, possibilitando, com isso, a geração de mapa dessa variável voltado à seleção de culturas a serem desenvolvidas ou aos seus tratamentos culturais. Até pouco tempo, esses estudos normalmente eram efetuados usando-se as ferramentas estatísticas convencionais aplicadas em condições de variabilidade espacial que, na maioria das vezes, não apresentavam exatidão, impedindo com isso um efetivo mapeamento da variável na região estudada (RABAH, 2002).

Para Dainese et al. (2003), a tecnologia inerente à agricultura de precisão baseia-se na coleta de informações sobre produtividade, atributos químicos e físicos dos solos, condições da cultura e do terreno, associadas a sua localização, as quais podem ser

expressas na forma de mapas digitais. Além disto, estas informações são, geralmente, coletadas na forma de amostragem apresentando uma dependência espacial, o que exige adequação do seu tratamento estatístico.

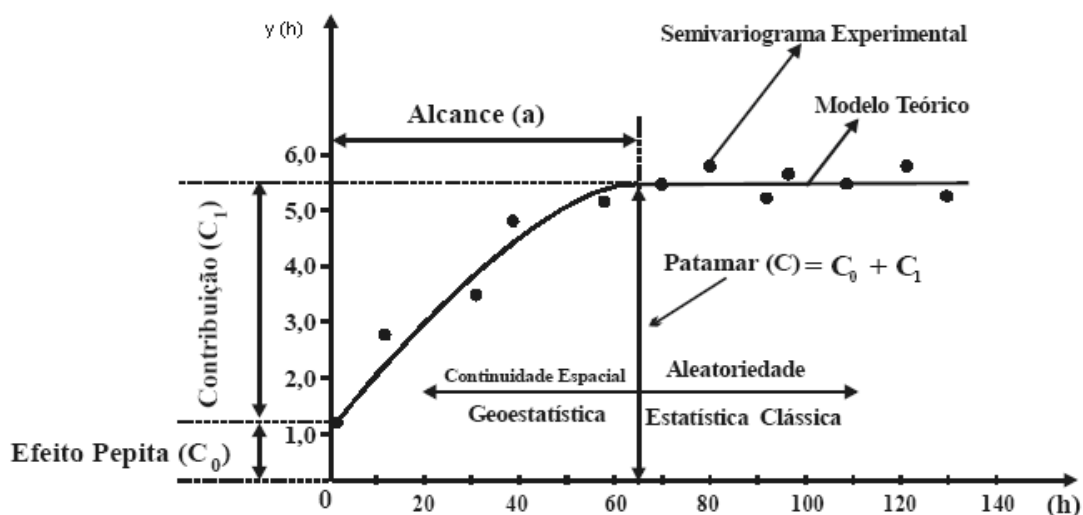
De acordo com Beraldo (2004), a diferença básica entre a estatística clássica e a geoestatística consiste em que a primeira requer valores das amostras independentes da sua localização, enquanto a segunda requer a localização espacial de cada ponto de amostragem.

Vicente (2004) relatou que, para produzir uma representação da distribuição do rendimento de uma cultura com base em amostras com dados georreferenciados, é necessário aplicar uma técnica de inferência. A geoestatística é uma destas ferramentas, pois permite estimar dados em locais não amostrados levando em conta o comportamento espacial do fenômeno, minimizando o erro dessa estimativa e podendo com isso reduzir os custos.

Os atributos físico-hídricos do solo têm preocupado pesquisadores por proporcionar diferenças no desenvolvimento, na produtividade e no manejo da irrigação, alterando resultados de pesquisas, mesmo com o solo considerado homogêneo em parcelas experimentais. Por essa razão, a caracterização da variabilidade espacial é essencial para um entendimento melhor das inter-relações entre atributos do solo. Com um modelo de dependência espacial de variáveis do solo, a geoestatística possibilita a estimativa em pontos não amostrados, viabilizando o mapeamento e o zoneamento da variável. Esse procedimento pode auxiliar na melhor distribuição das parcelas e experimentos em campo, assim como o manejo mais racional da água, de fertilizantes e de defensivos agrícolas (ANDRADE et al., 2005).

A geoestatística permite analisar a estrutura e a dependência espacial dos dados pela forma do variograma. O variograma é um gráfico, conforme exemplo da Figura 1, que relaciona a variância  $\gamma(h)$  de uma variável qualquer com uma distância ( $h$ ). Os variogramas apresentam três importantes parâmetros: a- o efeito pepita ( $C_0$ ), que se refere ao valor da variância para a distância zero e representa o componente da variação ao acaso; b- o patamar ( $C$ ) = ( $C_0 + C_1$ ), que é o valor da variância em que a curva estabiliza sobre um valor constante (é o máximo da variância); o patamar é atingido quando a variância dos dados se torna constante com as distâncias entre as amostras, e esse parâmetro permite a determinação

da distância limite entre a dependência e a independência entre as amostras;  $c$ - o alcance ( $a$ ), que é a distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, é considerado o limite da dependência espacial da grandeza medida (SILVA et al., 2003).



Fonte: Oliveira, 2003

**Figura 1.** Exemplo de um variograma experimental, modelo teórico

Para Vieira (2000), o alcance ( $a$ ), que é a distância onde o variograma alcança o patamar, indica a distância limite entre pontos correlacionados entre si. Pontos distanciados maiores do que o alcance são independentes e para essa análise pode-se utilizar a estatística clássica.

Segundo Andrade et al. (2005), a dependência espacial é quantificada pelo parâmetro alcance ( $a$ ) e o erro cometido devido à distância de amostragens, definido pelo efeito pepita ( $C_0$ ).

O alcance é um parâmetro importante no estudo do variograma, o qual representa a distância máxima que uma variável está correlacionada espacialmente, ou seja, os pontos localizados numa área de raio igual ao seu valor são mais homogêneos entre si do que com aqueles localizados fora dessa área. Segundo citado em Oliveira et al. (1999), o alcance é um parâmetro do variograma de extrema importância para o planejamento experimental e deve ser levado em consideração em termos de proposta de manejo da área, assim como na

determinação do número de pontos que devem ser amostrados para obter uma melhor representatividade.

A variabilidade espacial dos atributos do solo pode ser representada por mapas de superfícies, que são confeccionados, a partir de estimativas da variável em locais não medidos, pela técnica de interpolação conhecida como “Krigagem”. As informações mostradas nesses mapas são muito úteis para melhor entender a variabilidade da densidade do solo em campo e para identificar áreas que necessitam de diferentes tipos de manejo (TAKEDA, 2000).

A krigagem baseia-se em um modelo probabilístico, ou seja, num processo que trata os dados como resultados de um processo aleatório que não corresponde exatamente à realidade. Nos modelos probabilísticos, o erro residual médio e a variância dos erros podem ser estimados, e com isso podem ser atribuídos pesos às amostras, de modo que o erro médio seja zero e a variância seja mínima, estimando um ponto não amostrado. Por meio de uma combinação linear dos pesos de amostras de sua vizinhança, levando em conta a teoria de que pontos mais próximos são mais correlacionados entre si que os mais distantes (VICENTE, 2004). Segundo Andrade (2002), a krigagem é uma técnica de interpolação não tendenciosa, que possui variância mínima, sendo cada estimativa obtida pelo cálculo de uma média ponderada de um conjunto de observações ao redor de uma vizinhança.

De acordo com Vettorato (2003), a krigagem ordinária é o mais indicado método de interpolação para atributos de solos, podendo ser pontual ou em bloco. A krigagem pontual é indicada quando a coleta é de amostra simples, isto é, quando não foram misturadas várias amostras para compor uma amostra composta representando uma área. No caso da amostra composta, é indicada a krigagem em bloco.

#### **4.4 Variabilidade espacial dos atributos do solo**

Os atributos do solo, além da variação espacial, podem variar no tempo para cada posição no espaço. Esta variação, decorrente da ação de agentes naturais, assim como da ação do homem, deve se manifestar com maior intensidade em alguns atributos do que em outros (SLOT et al., 2001).

Segundo Carvalho et al. (2002), os avanços tecnológicos na agropecuária têm mostrado a importância de se medir a variação espacial e temporal de atributos que afetam o rendimento das culturas, com o objetivo de otimizar o aproveitamento de recursos e diminuir custos. O gerenciamento do processo de produção em função da variabilidade espacial dos atributos do solo é o que se convencionou chamar agricultura de precisão. Seu objetivo é correlacionar causas e efeitos, a partir de séries históricas de dados, e de suas distribuições espaciais.

Corá et al. (2004) afirmaram que conhecer a variabilidade dos atributos do solo, principalmente aqueles que controlam a produtividade das culturas, é fator importante em um sistema de produção que visa a sustentabilidade por meio do manejo localizado.

Souza et al. (2004) descreveram que a variabilidade espacial dos atributos do solo deve ser bem conhecida, visando minimizar os erros da amostragem e do manejo. O solo apresenta heterogeneidade, tanto vertical como horizontal, imposta pela natureza dos fatores responsáveis pela sua formação.

Conforme relatou Beraldo (2004), caracterizar o solo quanto ao seu potencial agrícola é relevante para o desenvolvimento de uma agricultura racional e adequada às condições ambientais de uma determinada área. Tal caracterização é fundamental principalmente se for levado em conta que os solos variam de um lugar para outro e que são muitas as suas características. O estudo da variabilidade espacial do solo introduza uma nova e importante dimensão nas análises da relação entre seus atributos e a produtividade das culturas.

#### 4.5 Medidas elétricas do solo

Um mesmo tipo de solo pode apresentar uma ampla variação nos valores de resistividade elétrica, pois são inúmeros os fatores que interferem no valor da resistividade elétrica de um determinado material (GALLAS, 2000).

Para Luck e Eisenreich (2001), o mapeamento da condutividade elétrica tornou-se uma ferramenta eficiente na investigação do comportamento e da variabilidade espacial de propriedades do solo, pois permite identificar áreas com propriedades semelhantes e delimitar unidades de gerenciamento diferenciado.

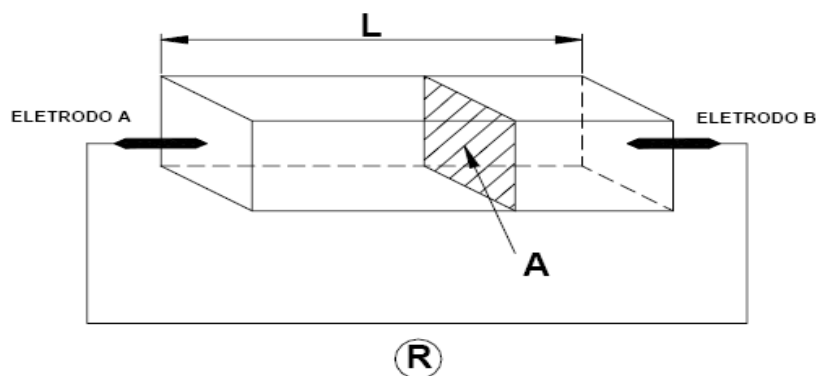
Auesrwald et al. (2001) verificaram que os níveis de condutividade elétrica do solo correlacionaram-se com atributos do solo onde sua variação espacial e temporal pode ser atribuída às variações nos seus teores de água, de argila e de sais dissolvidos.

Cook et al. (2002) estudaram a relação da condutividade elétrica do solo com atributos como os teores de água, de argila e de sais dissolvidos e verificaram que podem ser utilizados para classificar o solo quanto ao seu rendimento de produtividade.

No trabalho realizado por Zhang e Wienhold (2002), estudou-se a possibilidade de a condutividade elétrica efetuar com precisão e rapidez a detecção das alterações na concentração de nitrogênio no solo. Os resultados mostraram que a condutividade elétrica pode ser utilizada para detectar rapidamente as mudanças de nitrogênio inorgânico do solo, onde sais e carbonatos livres não estão presentes em grande quantidade.

A resistividade elétrica pode ser definida como a medida do grau de dificuldade que um determinado material impõe à passagem de uma dada corrente elétrica ou, o inverso, a condutividade elétrica é a facilidade com que a corrente elétrica passa através de certo material. A resistividade elétrica é dada em (ohm.m), e a condutividade elétrica dada em (siemens/m), sendo a relação entre elas inversa. Numericamente, a resistividade elétrica é igual à resistência elétrica (em ohm), medida entre os lados opostos de um cubo do material do qual se deseja medir a resistência elétrica (BORGES, 2002).

Outra forma de definir a resistividade elétrica, por meio da resistência elétrica do material, foi descrita por (Runyan, 1975 citado por Pincelli, 2004), na qual se utiliza uma amostra retangular, como apresentada na Figura 2.



Fonte: Pincelli, 2004

**Figura 2.** Amostra retangular para definir a resistividade elétrica

Conforme a Figura 2, para Miranda Neto (2002), o princípio básico do método eletrorresistivo é a imposição de um campo elétrico através de eletrodos de corrente elétrica ( $I$ ) e a medição da queda de potencial ( $V$ ) deste campo nos eletrodos receptores. Aplicando-se a forma elementar da Lei de Ohm ao circuito elétrico completado através do solo, tem-se que:

$$R = V / I \quad (1.1)$$

Entretanto, a resistência ( $R$ ) não define diretamente a propriedade elétrica do solo, pois depende do comprimento ( $L$ ) do condutor, da seção reta ( $A$ ) desse condutor e da constante de proporcionalidade ou resistividade ( $\rho$ ), esta sim uma propriedade do material. A resistência ( $R$ ) pode ser definida como:

$$R = \rho \cdot L / A \quad (1.2)$$

De (1.1) e (1.2) vem:

$$\rho = R \cdot A / L \quad (1.3)$$

O valor  $A / L$  é normalmente definido como um fator geométrico relacionado ao tamanho e tipo de arranjo dos eletrodos na modelagem considerada. A unidade adotada para o fator geométrico é o metro ( $m^2 / m$ ) e, portanto, para a resistividade, a unidade é o Ohm.m. A condutividade elétrica é o inverso da resistividade e tem a unidade de Siemens/metro (S/m), que é equivalente a mhos/metro ( $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ ).

De acordo com Steidle Neto et al. (2005), geralmente o termo resistividade elétrica é associado à condutividade elétrica, já que, com a imersão de dois eletrodos em solução existirá maior ou menor resistência à passagem de corrente elétrica, dependendo da concentração da solução. A relação entre condutividade e resistividade elétrica é inversamente proporcional.

Conforme observou Pincelli (2004), a condutividade elétrica depende principalmente da solução eletrolítica existente no solo. Solos com baixo teor de água apresentam elevada resistência elétrica. Alguns minerais presentes aparecem como isolantes, apesar de que em alguns solos pode existir uma pequena corrente sendo conduzida através da superfície das partículas. Portanto, o valor obtido para a condutividade elétrica de um solo é principalmente devido ao seu teor de água e dos sais dissolvidos.

Castro (2004) citou que a condutividade elétrica do solo depende do teor de água, da composição química da sua solução e dos íons trocáveis, da porcentagem de argila e da interação entre os íons não trocáveis e os trocáveis. As partículas do solo e das rochas, na sua maioria, são isolantes elétricos, mas são capazes de conduzir a eletricidade através dos poros retentores de umidade e das camadas eletricamente carregadas nas suas superfícies. Portanto, a porosidade do solo, o formato e o tamanho dos poros, a respectiva quantidade de água retida, assim como, a distribuição dos poros no solo, afetam a condutividade elétrica. Entre outros fatores que também afetam a condutividade elétrica é possível citar a concentração dos eletrólitos na água dos poros, a temperatura do solo, a quantidade e a composição dos colóides, e a densidade e o conteúdo de matéria orgânica. É um fator intrínseco do material, assim como outros fatores como a densidade e a porosidade. A grande utilidade da condutividade elétrica do solo é devido ao seu uso como uma ferramenta em potencial para auxiliar na investigação da variabilidade espacial dos atributos do solo.

Para Pacheco (2004), a condução elétrica, de maneira genérica, existe devido ao movimento de partículas com carga elétrica. Em condutores, as cargas elétricas pertencem aos elétrons, que entram em movimento ordenado devido à aplicação de uma diferença de potencial. Em meios porosos, a condução elétrica pode ocorrer de três maneiras: a eletrônica, por movimento de cargas pela superfície das partículas; a eletrolítica, associada ao movimento de íons na solução; e a dielétrica, que ocorre devido à polarização das partículas do solo. O fenômeno mais expressivo sobre a condução elétrica total é a eletrolítica. Essa condução ocorre devido a características do fluido intersticial, enquanto as demais são funções de aspectos mineralógicos.

Becegato (2005) salientou que a resistividade elétrica é uma ferramenta importante para auxiliar no mapeamento de solos, principalmente em áreas onde ocorrem variações nas texturas quanto aos teores de argila e areia. A resistividade elétrica é uma propriedade física de cada substância, tendo sido medida e tabelada para vários materiais. Um material homogêneo e isotrópico vai sempre exibir o mesmo valor de resistividade elétrica, conhecido como a resistividade verdadeira do material. No entanto, as rochas, e principalmente os solos, são meios de grandes variações laterais e verticais de características físicas e químicas, as quais se refletem nas determinações da resistividade. As rochas e os solos são bastante resistivos, mas a presença de substâncias metálicas, argilas e sais dissolvidos pode favorecer a passagem de corrente elétrica. A dependência da resistividade elétrica do solo, em relação a um grande número de fatores, pode ser uma vantagem no que diz respeito às ciências dos solos.

Durante décadas de estudos, os pesquisadores se empenharam na descoberta dos fatores que afetam a condutividade elétrica do solo. O teor de água, os atributos físicos e químicos podem ser citados como fatores de grande influência na condutividade elétrica do solo. As principais linhas de estudo da condutividade elétrica, e os fatores que influenciam sua mensuração, estão concentradas em três propriedades: textura, umidade e salinidade. Isso é devido a uma boa correlação existente na distribuição destes fatores no solo com o mapeamento da condutividade elétrica (PINCELLI, 2004).

Segundo Doerge et al. (2004), a condutividade elétrica é a habilidade que um material tem em transmitir (conduzir) corrente elétrica. Dessa forma, Pincelli (2004) preconizou que a utilidade dessa corrente elétrica no meio agrícola provém do fato de que os

componentes físicos existentes no solo apresentam diferentes níveis de condutividade elétrica. Os países mais desenvolvidos vêm utilizando há alguns anos a condutividade elétrica como um indicador no monitoramento de características do solo como textura, umidade, salinidade, entre outras. Por outro lado, na opinião de Faulin (2005), o mapeamento da condutividade elétrica do solo também permite inferir sobre variáveis como textura, salinidade, teor de água, entre outros.

Machado et al. (2004) observaram que o mapeamento da condutividade elétrica do solo é uma ferramenta simples que pode ser utilizada para caracterizar rapidamente e com maior precisão as diferenças nas suas propriedades, numa gleba considerada tradicionalmente como homogênea. Já Machado et al. (2006), em outro trabalho, verificaram que o mapeamento da condutividade elétrica do solo pode ser uma ferramenta útil no delineamento de áreas mais homogêneas, que apresentam condições mais similares. Em vista do grande número de amostras necessárias para se ter uma estimativa das condições gerais do solo numa lavoura, a amostragem em grade é laboriosa e de custo relativamente alto.

Terra et al. (2004) pesquisaram o relacionamento da quantidade de carbono do solo com a sua condutividade elétrica. Verificaram que a topografia e a condutividade elétrica explicaram 60% da variabilidade do teor de carbono orgânico do solo, sendo útil para avaliar o nível de impacto das práticas de gestão no sequestro de carbono.

No trabalho realizado por Farahani e Buchleiter (2004), a condutividade elétrica foi utilizada para elaborar o mapeamento das características de três áreas no Colorado (USA). Foi verificado que a condutividade elétrica manteve-se praticamente inalterada durante o período de 1998 a 2002. A estabilidade da condutividade elétrica ao longo do tempo foi atribuída a sua relação com os atributos do solo, como argila, areia e matéria orgânica. Os resultados justificaram que as medições da condutividade elétrica podem beneficiar diferentes fatores de produção e práticas de gestão na agricultura.

A condutividade elétrica é a variável mais empregada para se avaliar o nível de salinidade ou a concentração de sais solúveis na água de irrigação e no solo. Corresponde à medida da capacidade da água em conduzir eletricidade, crescendo proporcionalmente na medida em que a concentração de sais aumenta. Vários estudos vêm sendo realizados ultimamente para se avaliar a qualidade da água de irrigação na região semi-

árida do nordeste brasileiro. Em grande parte desses estudos, autores ajustaram os valores de cálcio, magnésio e a soma de cátions em função da condutividade elétrica, pelo uso de equações empíricas (RIBEIRO et al., 2005).

Logsdon (2006) conduziu um estudo com objetivo de determinar se a incerteza nos valores derivados das propriedades elétricas do solo poderia ser causada pelo instrumento de medida, pela adequação dos dados por uma equação matemática, ou pela variação da amostra. Os resultados mostraram que a maior incerteza foi causada na variação da amostra. A incerteza devido ao resultado dos dados de equações matemáticas foi muito pequena.

Segundo Corwin (2005), uma das ferramentas mais importantes e confiáveis para caracterizar a variabilidade espacial do solo diz respeito ao mapeamento da sua condutividade elétrica. Os mapas de condutividade elétrica podem ser usados para direcionar as amostragens do solo, nas análises das suas propriedades físicas e químicas.

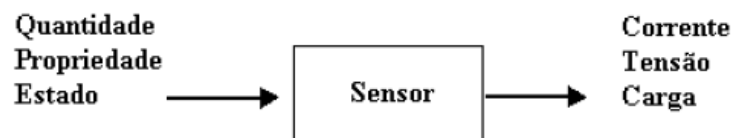
Também, Corwin e Plant (2005) confirmaram que, por ser um componente fundamental na avaliação das qualidades e aplicações ao solo, em curto prazo, a condutividade elétrica levará a caracterizar de forma global, a sua variação espacial.

#### **4.6 Sensores de medidas elétricas do solo**

Na agricultura de precisão, o conceito de gerenciamento localizado de cada ponto individual exige um mapa de propriedades físicas do solo, o qual é trabalhoso de ser obtido devido ao número representativo de amostras necessárias. Da mesma forma, para análises químicas do solo, deve-se tomar, ao menos, de 2 a 5 amostragens por hectare. Levando-se em conta o custo das análises laboratoriais, conclui-se que ocorre uma limitação econômica inicial para o uso da agricultura de precisão. É muito mais prático a utilização de sensores para determinar as características químicas e físicas do solo no local (NADAI et al., 2000).

Para Placido (2005), o sensor genérico pode ser representado como demonstra a Figura 3, onde o sinal de entrada pode ser uma quantidade, uma propriedade ou um estado, que o sensor converte em uma quantidade elétrica (carga, tensão ou corrente

elétrica) e que pode ser amplificada e modificada por circuitos eletrônicos de aquisição e controle.



Fonte: Placido, 2005

**Figura 3.** Diagrama de um sensor

Zhang et al. (2002) pesquisaram as tecnologias relacionadas à agricultura de precisão e forneceram uma visão geral dos tipos de sensores utilizados no campo: sensores de anomalia para detectar as ervas daninhas; sensores de colheita para ajustar as colheitadeiras quanto ao teor de água, maturidade e dimensões das sementes; sensores de campo utilizados para geração de mapas de localização, medição de parâmetros de desempenho traçados durante operações de campo, para identificar áreas no campo que necessitam de ações corretivas; sensores de rendimento para medir a produtividade das culturas; sensores do solo para medir os diversos fatores e correlacionar com seus atributos.

Adamchuka et al. (2004) relataram que embora exista uma grande variedade de sensores do solo, a maioria deles envolve um dos seguintes métodos de medição: os sensores elétricos e eletromagnéticos, que medem a resistividade, a condutividade, a capacidade ou a indutância elétrica, sendo afetados pela composição do solo; os sensores óticos, que usam ondas eletromagnéticas para detectar o nível da energia absorvido/refletido por partículas do solo; os sensores mecânicos, que medem forças resultantes de uma ferramenta acoplada com o solo; os sensores acústicos, que quantificam o som produzido por uma ferramenta que interage com o solo; os sensores pneumáticos, que avaliam a habilidade de injetar o ar no solo; e os sensores eletroquímicos, que usam as membranas íon-selective, que produzem uma tensão de saída como resposta à atividade dos íons selecionados. Mas a resposta rápida, o custo baixo e a durabilidade fazem dos sensores elétricos e eletromagnéticos as técnicas mais acessíveis para mapeamento do solo que podem ser correlacionados com a textura, a salinidade, a matéria orgânica, o grau de umidade e outros atributos do solo.

Também se observou que os tipos de solo (principalmente textura do solo) afetam significativamente os sensores elétricos.

Em estudo realizado por Castro (2004), verificou-se que os métodos de medição da condutividade elétrica do solo têm sido utilizados por geólogos há muitos anos, particularmente para ajudar na localização de depósitos de minerais metálicos. Nos últimos vinte anos, cientistas do solo passaram a utilizar esses sensores em estudos aplicados à agricultura. Nesse meio, os sensores da condutividade elétrica foram primeiramente utilizados para medição de sais solúveis e da umidade do solo.

A maioria dos sensores descritos na literatura fornece o sinal de saída, que é afetado por mais de uma característica agrônômica do solo. Sensores elétricos e eletromagnéticos são instrumentos de medida baseados em circuitos elétricos e usados para determinar a habilidade de determinados meios em conduzir ou acumular a carga elétrica. Se o solo for usado como tal meio, suas características físicas e químicas podem afetar o comportamento do circuito e, assim, os parâmetros elétricos medidos. A habilidade do solo em conduzir a eletricidade é quantificada geralmente pela resistividade elétrica ou pela condutividade elétrica. Ambos os valores são relacionados à tensão e à corrente elétrica para uma configuração conhecida de transmissão e de recepção dos elétrons. Parece que as propriedades condutoras e capacitivas do solo, que podem ser medidas, são afetadas por diversas características agrônômicas do solo (ADAMCHUKA et al., 2004).

Na opinião de Sudduth e Kitchen (2004), a viabilidade e a aplicabilidade da condutividade elétrica podem ser maximizadas por meio da boa seleção de sensores, assim como, pela escolha de apropriados métodos de análise de dados.

Segundo Johnson et al. (2005), a condutividade elétrica do solo pode ser utilizada para verificar alterações do nitrogênio no solo. No entanto, estudaram um solo arenoso e não encontraram correlação entre a condutividade elétrica do solo e os teores de nitratos. A seleção de sensores apropriados de condutividade elétrica do solo (contato direto, indução eletromagnética e reflectometria no domínio do tempo) pode melhorar a sensibilidade das flutuações do nitrogênio, em profundidades específicas do solo. A condutividade elétrica tem potencial para avaliar rapidamente os teores de nitratos no início do período vegetativo, fornecendo assim uma informação essencial para o cálculo das taxas de aplicação de adubo.

Sudduth e Kitchen (2006) pesquisaram se a combinação dos dados de múltiplos sensores de condutividade elétrica resultaria numa melhor resposta do que os dados de cada sensor isoladamente. Foram coletados dados de três sensores comerciais de condutividade elétrica, em duas áreas do Missouri (USA), para verificação de diversos fatores do solo. Verificaram que houve uma melhora nos resultados utilizando múltiplos sensores para estimar parâmetros nas camadas abaixo da superfície onde observaram uma redução de 30% do erro em relação à utilização de sensores isoladamente.

Para Grego et al. (2006), a investigação de possíveis causas da variabilidade espacial encontrada nos resultados de produtividade das culturas tem sido atribuída aos fatores de solo, como as propriedades físicas e químicas. Entretanto, estas são obtidas por amostragens que, na maioria, exigem alta demanda de mão-de-obra, de tempo e de custo. A condutividade elétrica do solo tem chamado a atenção, principalmente quando obtida por métodos eficientes e rápidos, como pelos sensores de contato direto com o solo encontrados no mercado.

Faulin (2005) ressaltou que as novas tecnologias de sensoriamento direto ou remoto de fatores do meio ambiente, primordiais na produção agrícola, estão constantemente sendo geradas, aperfeiçoadas e difundidas. Uma série de sensores, para monitorar propriedades físico-químicas do solo, têm sido proposta, alguns deles já em utilização comercial ou em caráter experimental. É o caso dos diferentes modelos de sensores de condutividade elétrica do solo.

#### **4.7 Métodos para medições elétricas do solo**

A resistividade elétrica é considerada um indicador para caracterização de vários atributos do solo. Sua análise pode ser efetuada *in situ*, por meio de equipamentos próprios, seguindo critérios e normas consolidadas, ou em laboratório (PAZ e CAMPELO, 2005).

O método de determinação da condutividade elétrica do solo, obtida com equipamentos móveis de campo, também denominada de condutividade elétrica aparente, é diferente do método da determinação da condutividade elétrica do solo obtida em laboratório com a pasta de saturação ou com extratos aquosos de solo. A medição da condutividade

elétrica com equipamentos móveis é obtida in situ, em condições reais de campo e representa a condutividade elétrica da massa e não apenas da solução do solo. Por sua vez, condutividade elétrica medida em laboratório difere da determinada in situ, pois permite a padronização da relação solo-água (MACHADO et. al., 2006). Assim, conforme Johnson et al. (2001), ambas as determinações integram os efeitos da argila (tipo e quantidade) e os teores de sais (cátions e ânions solúveis) resultando, assim, numa significativa correlação.

Segundo Molin et al. (2005), a medição da condutividade elétrica do solo pode ser efetuada por contato direto no solo, fazendo passar uma corrente elétrica entre os eletrodos isolados, ou indiretamente, com o uso de corrente induzida por um campo magnético, sem contato com o solo. Para ambos os casos, existem equipamentos comerciais que foram testados e mostraram resultados semelhantes, conforme descrição da literatura. Portanto, Rabello et al. (2005) relataram que os métodos que utilizam as propriedades dielétricas são bastante utilizados atualmente, consistindo em um grande número de sistemas comerciais com diversas características específicas de design, resolução, precisão e preço. Dentre as técnicas dielétricas, são citadas as que utilizam o princípio da Reflectometria no Domínio do Tempo (Team Domain Reflectometry - TDR) e a capacitância elétrica.

Em pesquisa realizada por Allred et al. (2006), foram testados três métodos geofísicos de medição da condutividade elétrica do solo (indução eletromagnética, capacitância acoplada à resistividade, e resistividade por contato galvânico). Concluiu-se que todos eles foram capazes de fornecer informações úteis sobre a condutividade elétrica do solo, sendo tais resultados de grande utilidade para se empregar as técnicas de agricultura de precisão.

#### **4.7.1 Método laboratorial de avaliação da condutividade elétrica do solo**

Conforme Blanco (1999), o índice que expressa a salinidade é a condutividade elétrica pela utilização de instrumento de medida de laboratório denominado condutímetro. A condutividade elétrica do solo é determinada também pela saturação de uma amostra de solo com água destilada e posterior filtragem a vácuo. O volume de líquido filtrado denomina-se extrato de saturação e a condutividade elétrica é chamada de condutividade elétrica do extrato de saturação.

Em geral, a condutividade elétrica do solo é medida em solução, usando um aparelho apropriado (condutivímetro), após a dissolução da amostra em água na proporção de até 5 vezes. Desse modo, o valor medido não representa a condutividade elétrica do solo como ele é realmente, isto é, insaturado. Além disso, este método não pode ser utilizado para examinar o efeito de parâmetros físicos do solo associados aos implementos de preparo do solo, como por exemplo, a densidade do solo, umidade e força do campo elétrico aplicado (NADAI et al., 2000).

Diversos são os métodos empregados para estimar a salinidade dos solos, sendo a aferição dos valores da condutividade elétrica da solução do solo o mais prático e, portanto, o mais utilizado. A condutividade elétrica de uma solução aquosa representa a facilidade que esta tem em transportar corrente elétrica, ou seja, mede a resistência à passagem dos elétrons, que é função da quantidade de eletrólitos presentes na solução (VALERO, 2006).

Em pesquisa realizada por Mccutcheon et al. (2006), verificou-se a relação entre a condutividade elétrica, através de um condutivímetro, e os atributos do solo. Foram recolhidas amostras do solo a partir de 198 pontos amostrais no campo, sendo analisadas em laboratório o conteúdo de água e a textura do solo (areia, silte e argila), entre outros atributos. Os resultados mostraram que a quantidade de água do solo foi um fator dominante que afetou a sua condutividade elétrica e que os outros atributos medidos, tais como a areia, silte e argila, tiveram respostas quase iguais, de correlações fracas a moderadas com a condutividade elétrica do solo.

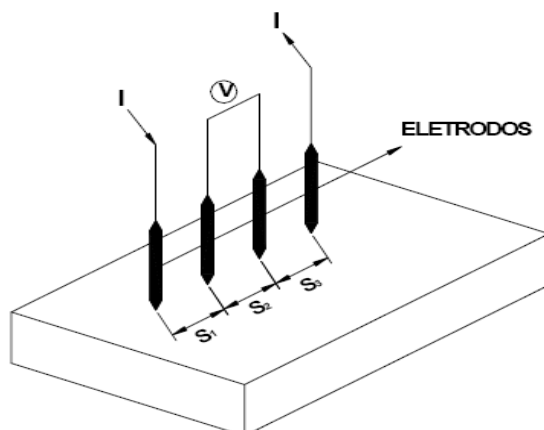
Segundo Queiroz et al. (2005), o método laboratorial do extrato de saturação é considerado de referência para determinação da condutividade elétrica do solo. Contudo, é subjetivo, demanda tempo e infra-estrutura laboratorial, limitando o número de determinações. Desta forma, faz-se necessário o desenvolvimento de metodologias que realizem determinações com maior rapidez e que possuam boa correlação com o método padrão.

#### 4.7.2 Método do contato direto no solo

A eletrorresistividade é um método geométrico baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais, tendo sido utilizado nos mais variados campos de aplicação das geociências. Os métodos geométricos possuem sua origem no século XVIII com a descoberta da resistividade das rochas e a condutividade elétrica do solo. Os primeiros trabalhos de aplicação em prospecção mineral datam do início do século XX. Dentre os diversos pesquisadores, que contribuíram para o seu desenvolvimento, destacam-se Conrad Schlumberger, da “Escola Francesa”, e Frank Wenner, da “Escola Americana”. Eles foram responsáveis pela introdução do arranjo de quatro eletrodos para medidas da resistividade de superfície (BORGES, 2002).

No método eletrorresistivo, a imposição do campo elétrico e a medição do potencial são feitas segundo diversos arranjos de eletrodos, mas os mais usuais são os arranjos simétricos de Wenner e de Schlumberger (MIRANDA NETO, 2002).

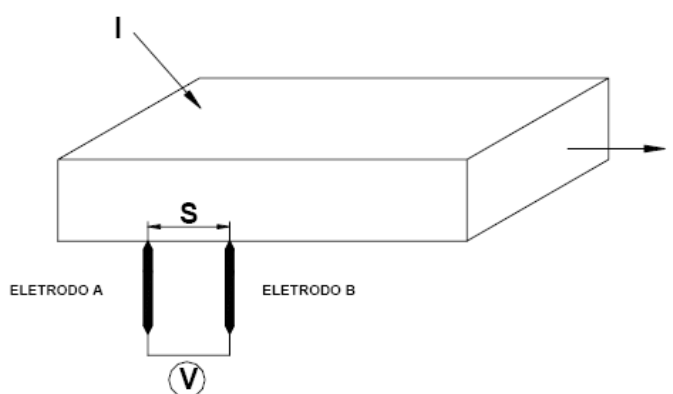
No trabalho realizado por Castro (2004), citou-se que Wenner foi o primeiro a apresentar um modelo teórico desse tipo de sensor que, posteriormente, seria desenvolvido e originaria alguns modelos de sensores da condutividade elétrica aparente por contato direto, utilizado nos dias de hoje. Esse modelo teórico consistia da utilização de quatro terminais para medir a resistência elétrica do solo, conforme a Figura 4. Os quatro eletrodos são dispostos linearmente e equidistantes. O método da corrente direta requer um contato galvânico entre o solo e cada um dos quatro eletrodos, o que é necessário para introduzir a corrente elétrica ( $I$ ), entre os eletrodos externos no solo, e medir a voltagem ( $V$ ) resultante, entre os eletrodos internos. Ao variar o espaçamento ( $S$ ) entre esses eletrodos, o alcance da leitura da profundidade no solo pode ser alterado. Quanto maior o espaçamento entre os eletrodos, maior é a profundidade da leitura.



Fonte: Pincelli, 2004

**Figura 4.** Método dos quatro eletrodos

Pincelli (2004) descreveu que a resistividade elétrica também pode ser determinada pelo método que utiliza dois eletrodos, de acordo com a Figura 5.



Fonte: Pincelli, 2004

**Figura 5.** Método dos dois eletrodos para definir resistividade elétrica

Onde:  $I$  = corrente elétrica;  $V$  = tensão elétrica e  $S$  = espaçamento entre os eletrodos

Conforme Silva (2006), a eletrização por contato se dá quando um corpo eletricamente carregado entra em contato físico com um corpo eletricamente neutro, carregando-o e estabelecendo-se um caminho de vazão para os elétrons em excesso, fazendo

com que tais elétrons se distribuam entre os dois corpos, ficando ambos eletrizados negativamente pelo excesso de elétrons.

Jabro et al. (2006) investigaram a variabilidade espacial da condutividade elétrica por contato no solo com o equipamento Veris 3100 (Figura 6). Verificaram que ela foi espacialmente distribuída, com fraca dependência espacial dentro da área mapeada no campo. A partir deste estudo os autores verificaram que a condutividade elétrica tem potencial para ajudar os agricultores na definição das áreas de manejo.



Fonte: Faulin, 2004

**Figura 6.** Implemento de condutividade elétrica Veris 3100

### **4.7.3 Método da indução magnética**

O método da indução magnética utiliza um sensor por indução eletromagnética, não penetrante, que mede a condutividade elétrica do solo sem contato físico, mas apenas a partir da atração e repulsão de cargas elétricas (SILVA, 2006).

Para King et al. (2001), o funcionamento do método de indução magnética consiste basicamente de um eletrodo de transmissão que é suspenso próximo à superfície do solo, o qual é energizado com uma corrente alternada numa frequência de áudio. Isso estabelece um campo magnético que induz uma fraca corrente elétrica no solo, que por sua vez gera um segundo campo magnético a uma distância específica do eletrodo transmissor. Um segundo eletrodo, receptor suspenso, gera uma corrente alternada em resposta proporcional àquela gerada pelo eletrodo transmissor, mas modificada pela condutividade elétrica aparente do solo. Isso pode ser usado para obter uma leitura da condutividade aparente do solo que é linearmente proporcional à razão dos dois campos magnéticos.

Jung et al. (2005) testaram um sensor de condutividade elétrica baseado na indução eletromagnética para correlacionar com indicativos da qualidade de um solo argiloso. Verificaram que a condutividade elétrica pode ser relacionada com a textura, a densidade e a troca catiônica do solo. Os resultados foram melhores quando o sensor foi usado bem próximo à superfície do solo, em relação à utilização do sensor mais elevado da superfície do solo.

### **4.7.4 Método das propriedades dielétricas**

#### **4.7.4.1 Reflectometria no domínio do tempo – (TDR)**

O equipamento utilizado para a determinação da permissividade dielétrica aparente do solo é constituído basicamente de um emissor de pulso, cabos, hastes (normalmente duas ou três) e um interpretador de sinal, que percebe a emissão do pulso eletromagnético e a chegada do pulso refletido, determinando assim o tempo de percurso. Uma característica importante que estimula o uso do TDR é o pequeno grau de perturbação do solo em sua instalação. A medição da constante dielétrica dos materiais encontrou aplicações

já no começo do século XX, inicialmente nas pesquisas físicas e químicas e posteriormente em disciplinas aplicadas da engenharia, especialmente em algumas áreas de eletrônica. Investigações acerca da interação da transmissão de ondas de rádio e o meio-ambiente mostraram as primeiras relações entre os vários materiais e a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas. No solo, estudou-se o comportamento destas transmissões e a sua relação com a umidade, temperatura e o conteúdo de sais (CICHOTA, 2003).

Para Valero (2006), a técnica da TDR, como método para estimativa da condutividade elétrica do solo, vem se destacando no cenário das técnicas empregadas para medidas de parâmetros físicos do solo. Entre os métodos não destrutivos, que são empregados para determinação da umidade do solo, a reflectometria no domínio do tempo (TDR) é considerada atualmente como a mais adequada. O método permite calcular de forma simples a permissividade dielétrica, definida como a polarização elétrica adquirida por uma substância como consequência da indução gerada por um campo eletromagnético. O uso da reflectometria no domínio do tempo (TDR) permite o monitoramento da condutividade elétrica do solo em tempo real. Uma sonda de TDR pode, ao mesmo tempo, estimar num dado local do solo a umidade e a condutividade elétrica, o que abre caminho para inferir sobre a concentração de um dado nutriente, pela condutividade elétrica da solução do solo.

Segundo Castiglione et al. (2006), a possibilidade de utilizar múltiplas leituras automatizadas de condutividade elétrica com sensores TDRs representa um grande benefício para investigação das características do solo.

O princípio da TDR apresenta vantagens quanto à rapidez na obtenção da leitura da umidade, proporciona a ação repetitiva das leituras, a não destruição da região amostrada, a não emissão de radiações ionizantes e a portabilidade e facilidade de acoplamento a dispositivos coletores de dados pouco sensíveis às características texturais e estruturais do solo. Outra vantagem inclui a possibilidade de se efetuar as medições de forma automática, em condições de laboratório, ou de campo, em qualquer direção no perfil do solo e no tempo real. Como desvantagem, considerando tanto o testador de cabos como as guias de onda, está o custo ainda alto para os padrões da agricultura nacional. Os custos apenas das guias de onda compradas do fabricante de TDR chegam a ser compatíveis com os custos dos tensiômetros. Além disso, existe a dependência quanto ao tipo de solo (mineral ou orgânico),

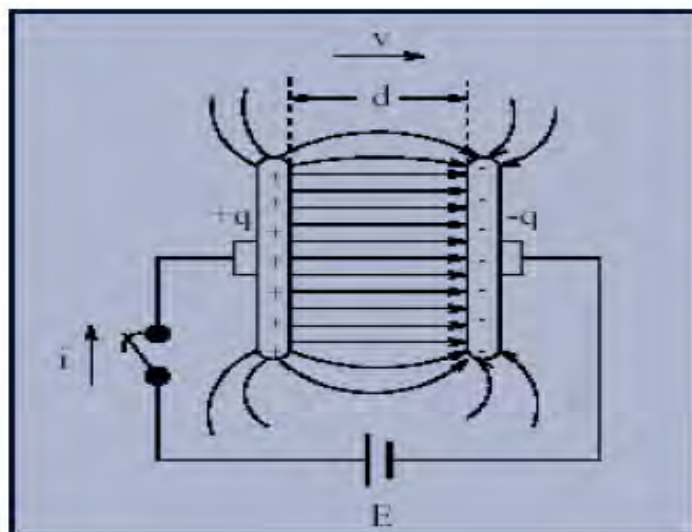
quanto à presença de materiais magnéticos e também a necessidade de uma calibração específica e trabalhosa para cada tipo de solo (VALERO, 2006).

#### 4.7.4.2 Capacitância elétrica

Os capacitores se apresentam numa grande variedade de tamanhos e formas. Entretanto, os elementos básicos de qualquer capacitor são dois condutores isolados de formatos arbitrários, chamados de placas, para quaisquer que sejam suas geometrias. São bem conhecidos os capacitores de placas paralelas, os esféricos e os cilíndricos. Quando um capacitor é carregado, suas placas adquirem cargas iguais, mas de sinais opostos,  $+q$  e  $-q$ , como mostra a Figura 7. Entretanto, tal carga do capacitor é referida como sendo meramente  $Q$ , o valor absoluto das cargas sobre as placas. Uma vez que as placas são condutoras, constituem superfícies equipotenciais. Além disso, existe uma diferença de potencial entre as duas placas, representada por  $V$ . A carga  $Q$  e a diferença de potencial  $V$  para um capacitor são proporcionais entre si e mediadas por uma grandeza  $C$ , isto é,

$$Q = C.V \quad (2)$$

Onde a constante de proporcionalidade  $C$  é chamada de capacitância do capacitor. A unidade da capacitância no Sistema Internacional de unidades é o coulomb por volt, ou farad (CARVALHO e SILVA, 2002).



Fonte: Silva, 2005

**Figura 7.** Circuito de funcionamento do capacitor

Um capacitor é um dispositivo que consiste de dois condutores separados por um meio dielétrico. Por definição, a capacitância de um capacitor é a relação entre a carga de um dos condutores e a diferença de potencial entre eles. Os sensores capacitivos são dispositivos capazes de detectar variações de capacitância, que podem ser convertidas num desvio do equilíbrio (tensão) numa ponte feita com capacitores e resistores, alimentada por uma fonte de tensão. O desvio de tensão é inversamente proporcional ao deslocamento entre as placas. As variações de capacitância podem ser causadas por alterações na área das placas, na constante dielétrica do meio ou na distância entre as placas (SILVA et al., 2004).

Para Silva (2005), o dielétrico de um capacitor pode ser o ar, a mica ou qualquer dos vários outros tipos de isolantes existentes. As placas do capacitor atuam como pontos de armazenamento para os elétrons, enquanto que a diferença de potencial atua sobre o dielétrico para estabelecer o campo elétrico.

Um capacitor é um componente que tem a capacidade de armazenar cargas, ficando nesta situação com uma das placas carregada positivamente e a outra, negativamente. Quando carregado, observa-se um campo elétrico entre as placas. Em

conseqüência, observa-se também uma diferença de potencial entre elas. A quantidade de energia que um capacitor consegue armazenar depende da tensão a que o componente for submetido no processo de carga, e de características construtivas. A influência das características construtivas é expressa na grandeza capacitância, que é a grandeza que caracteriza um capacitor. Esta depende basicamente de fatores construtivos e define se um capacitor pode armazenar mais ou menos energia que outro. A capacitância será maior quanto maiores forem as placas e quanto mais próximas elas estiverem. Além destes fatores, que dependem exclusivamente das dimensões físicas do componente, a escolha do dielétrico que fica entre as placas tem influência direta no valor da capacitância (SILVA, 2006).

Os métodos que utilizam a propriedade da capacitância elétrica são também denominados métodos dielétricos. Conforme Cichota (2003) descreveu em seu trabalho, qualquer material, puro ou composto, pode ser descrito e ter seu estado caracterizado por algumas grandezas físicas (massa, volume, temperatura, umidade, etc.). Nesse sentido, o comportamento dielétrico de um dado material é descritível pela sua permissividade ou, como é mais comum, pela permissividade relativa ou constante dielétrica, que é a razão entre a permissividade do material e a do vácuo. O nome “constante dielétrica” não é muito apropriado, pois essa propriedade é bastante variável, em função da frequência, da temperatura, da umidade do material, etc. A permissividade relativa indica em quanto aumenta a capacitância de um capacitor ao substituir o vácuo, como meio dielétrico, pelo material em questão.

Green et al. (2005) realizaram uma experiência para melhorar o conhecimento sobre o comportamento e características de um sensor capacitivo e verificaram que o conteúdo de água do solo pode ser estimado diretamente a partir da permissividade dielétrica do solo.

Com o objetivo de caracterizar o comportamento de sensores capacitivos, para monitorar a umidade do solo, Rende e Biage (2002) verificaram que o comportamento dos sensores capacitivos tinham características específicas para cada tipo de solo, sendo assim necessário desenvolver curvas de calibração para cada tipo de solo.

## **5 MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1 Área de estudo**

A coleta dos dados da pesquisa foi realizada em uma gleba da Fazenda Capão da Onça, pertencente à Universidade Estadual de Ponta Grossa, localizada na região dos Campos Gerais, no município de Ponta Grossa, no estado do Paraná, entre as coordenadas UTM 594298 e 597032 m E, 7222955 e 7225387 m N Datum SAD 69. Em um Cambissolo Háplico distrófico de textura média. O clima da região, segundo Köeppen, é do tipo Cfb, sempre úmido, quente temperado, sem estação seca definida e com geadas freqüentes no inverno e temperaturas médias de 22 °C no verão. A precipitação anual é em torno de 1.422 mm, sendo janeiro o mês mais chuvoso, com 164,4 mm, e agosto o mês mais seco, com 71,2 mm, e a umidade relativa do ar de 75%, em média.

### **5.2 Materiais e equipamentos**

#### **5.2.1 Materiais**

- Cano de cobre de 2,2 cm - (50 cm de comprimento)
- Cano plástico PVC de 2,2 cm - (20 cm de comprimento)
- Tubo de cola, fita adesiva e etiquetas

- Condutores e conectores elétricos
- Parafusos, arruelas, porcas e terminais de fiação
- Enxada, cavadeira, trado e trena
- Sacos plásticos, balde de 5 litros e embalagens de alumínio para amostras de solo
- Martelo, estaca (pré-furadeira de cobre - 2,2 cm) e estaca (pré-furadeira de ferro - 2 cm)
- Prancheta, formulários e papéis para anotações de campo

### **5.2.2 Equipamentos**

- GPS portátil
- Microcomputador e impressora
- Balança de até 2 kg, balança de precisão e estufa
- Multímetro analógico com ohmímetro
- Multímetro digital com capacitômetro
- Condutivímetro digital

### **5.2.3 Programas computacionais**

- Software Statplus Professional versão 4.6 - 2007
- Programa de análise geoestatística GS+ versão 7.0 – 2004
- Software Geofarm 2.1 – 2003
- Microsoft Office Excell 2003
- Golden Software Surfer versão 8.0 – 2002
- Microsoft Paint 5.1 – 2001

### **5.2.4 Montagem do sensor de medidas elétricas**

O sensor de medidas elétricas utilizado no estudo tem o princípio de funcionamento semelhante ao método dos dois eletrodos, conforme foi exposto por Pincelli (2004). O processo de montagem do sensor seguiu seu desenvolvimento pela escolha de alternativas práticas e de baixo custo. Primeiramente, foram utilizadas diversas medidas de

cabos de cobre de condutores elétricos utilizados em instalações residenciais. Porém, mesmo usando condutores de maior diâmetro, ao inseri-los no solo, verificou-se que eles sofreram deformações e não responderam com níveis de sinais satisfatórios.

Procurou-se, então, por outro material que fosse mais rígido e menos susceptível à deformações. Foi adotada a opção de utilizar tubos de cobre e de PVC, com 2,2 cm de diâmetro, utilizado em sistemas de água quente residenciais.

Foram realizados vários testes com diversas medidas dos eletrodos e do isolador, até se definir pelo tamanho atual. Os testes preliminares foram realizados no Laboratório de Eletrônica do Departamento de Informática da Universidade Estadual de Ponta Grossa, onde foi confeccionado o sensor. A forma e as dimensões do sensor foram definidas após diversos testes em reservatórios com capacidade de 10 litros, contendo solo seco e úmido. Verificou-se que o melhor resultado foi dimensionar o sensor com 5 cm de comprimento cada para eletrodo e também o isolador, formando uma haste de 15 cm de comprimento e 2,2 cm de diâmetro para aplicação vertical no solo, com uma das extremidades com forma pontiaguda para facilitar a penetração no solo, confeccionada com material isolante de uma resina acrílica, como pode ser observado na Figura 8. Os terminais de conexão dos cabos condutores foram fixados nos eletrodos com parafusos, arruelas e porcas. O isolador entre os eletrodos e a ponteira da haste do sensor foram encaixados e colados. Os cabos utilizados para leitura das medidas elétricas do sensor foram rígidos, para reduzir as perdas dos sinais de leituras.



**Figura 8.** Sensor de medidas elétricas

## **5.3 Métodos**

### **5.3.1 Seleção dos pontos de amostragem**

Com o auxílio do programa computacional Geofarm 2.1, foram definidos os pontos amostrais. Inicialmente foi definida uma malha regular de 40 x 40 metros, para as leituras das medidas elétricas do solo, realizada em uma área comercial de plantio direto com aproximadamente 13 hectares, totalizando 81 amostras, resultando em aproximadamente 6,2 leituras por hectare.

### **5.3.2 Medidas elétricas do solo**

Para realizar as medidas de resistência e capacitância elétrica do solo através do sensor em estudo foram utilizados, respectivamente, um multímetro analógico com ohmímetro e um multímetro digital com capacitímetro. Este método é semelhante ao utilizado por Rabello et al. (2005), onde as medidas do sensor são obtidas por meio de um multímetro. A leitura dos valores da resistência e capacitância elétrica, e também a coleta das amostras do solo, foram realizadas no período de novembro à dezembro de 2006, imediatamente após a colheita da cultura do trigo.

O sensor foi introduzido verticalmente no solo até 20 cm de profundidade. Essa medida foi escolhida porque é nela que se situa a faixa onde a maior parte das raízes se concentra. Para proteger e facilitar a colocação do sensor no solo foi utilizado um instrumento pré-furador, confeccionado com as mesmas dimensões e o mesmo tubo de cobre usado na montagem do sensor. As medidas de resistência e de capacitância elétrica foram realizadas para cada ponto amostral antecedendo imediatamente a coleta das amostras do solo.

### **5.3.3 Resistência elétrica do solo**

O instrumento de medida utilizado para a coleta dos dados de resistência elétrica do solo foi um multímetro analógico, conforme mostra a Figura 9, selecionado para operar como ohmímetro e calibrado para operar na escala de multiplicação de

100 vezes. Quando houve necessidade de mudança de escala o instrumento foi calibrado novamente.



**Figura 9.** Esquema de medição da resistência elétrica do solo com ohmímetro

#### **5.3.4 Capacitância elétrica do solo**

O instrumento de medida utilizado para a coleta dos dados de capacitância elétrica do solo foi um multímetro digital, selecionado para operar como capacitímetro, calibrado para operar na escala de 4 microfarads. Antes de conectar os cabos do sensor no capacitímetro, os terminais do sensor foram (curto-circuitados) encostados um no outro, para descarregar as cargas elétricas existentes nos eletrodos. Esse procedimento foi realizado para cada ponto de medida.

#### **5.3.5 Amostragem do solo**

A coleta das amostras do solo foi feita de acordo com um plano espacial determinado, mantendo uma regularidade na coleta de amostras por toda a área. A distância entre as amostras não foi igual à malha regular definida anteriormente, mas a posição relativa de cada amostra foi georreferenciada com aparelho GPS portátil, com precisão de 6 a 9 metros, para possibilitar a avaliação da dependência espacial entre os valores medidos, como

é possível visualizar na Figura 10. As amostras foram coletadas manualmente, com trado de 10 cm de diâmetro, na profundidade de 5 a 20 cm, obedecendo a uma seqüência sistemática em cada ponto de amostragem. Na profundidade de 0 a 5 cm, não foram coletadas amostras, considerando que nesta profundidade o contato com o sensor seria prejudicado por apresentar contato deficiente, foi observado que a colocação do sensor no solo aumenta em alguns milímetros o diâmetro de contato da superfície do solo com o sensor.



Escala – 1:8700

**Figura 10.** Ortofoto da área de estudo e localização georreferenciada das amostras

Logo após a retirada do sensor do solo, em cada ponto amostral foi coletada uma amostra de 1,2 kg de solo, a qual foi colocada num balde. Em seguida, para cada amostra, uma sub-amostra foi retirada do balde, na quantidade de 0,2 kg de solo, acondicionada em embalagem própria de alumínio, devidamente lacrada. Outra quantidade de 0,2 kg foi retirada e colocada em saco plástico específico, identificado pelo número do ponto amostral respectivo. Este conjunto de amostras foi levado ao Laboratório de Solos da Universidade Estadual de Ponta Grossa para realizar as análises dos teores de água e a condutividade elétrica, conforme metodologia preconizada para tais atributos (EMBRAPA, 1997).

O restante da amostra foi colocado em saco plástico específico, identificado pelo número do ponto amostral, e levada para análise química (macro nutrientes) e análise física (areia, silte e argila) nos Laboratórios da Faculdade de Ciências Agrônômicas, da Universidade Estadual Paulista, Campus de Botucatu.

As amostras do solo para a determinação do teor de água, condutividade elétrica, análise química e física do solo foram coletadas logo após a realização das leituras de resistência e capacitância elétrica, para cada ponto amostrado.

#### 5.4 Análise dos dados

Para analisar a correlação das leituras de resistência e capacitância elétrica medidas pelo sensor em relação aos atributos físicos-químicos e o teor de água do solo, foram utilizados os resultados das amostras do solo analisados nos laboratórios referenciados anteriormente.

As amostras foram analisadas para determinar as características químicas de: potencial de hidrogênio (pH), acidez potencial (H+Al), matéria orgânica (M.O.), fósforo extraído da resina (Presina), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), e os seguintes parâmetros: soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), condutividade elétrica (Ce), teor de água e saturação por bases (V%). Da mesma forma, determinar as características físicas de: teor de areia, teor de silte e teor de argila. Os resultados obtidos correspondem às seguintes unidades de medidas:

- **mmol.dm<sup>-3</sup>** = acidez potencial (H+Al); cálcio (Ca); magnésio (Mg); potássio (K); soma de bases (SB) e capacidade de troca de cátions (CTC);
- **g.dm<sup>-3</sup>** = matéria orgânica (M.O);
- **mg.dm<sup>-3</sup>** = fósforo extraído pela resina (Presina);
- **sem unidade** = potencial de hidrogênio (pH) e saturação por bases (V%)

As metodologias de determinação dos teores desses atributos do solo foram as mesmas que as de (RAIJ et al., 2001).

#### **5.4.1 Análise exploratória**

Os resultados das análises efetuadas nas amostras de solo e dos valores levantados em campo (resistência e capacitância elétrica do solo) foram submetidos à análise exploratória do conjunto de dados pela estatística clássica, obtendo-se as medidas de posição (média, moda e mediana) e de dispersão (valor mínimo, valor máximo e desvio padrão). Para tanto foi utilizado o programa Microsoft Excel 2003. Este procedimento foi realizado para que se pudesse conhecer a distribuição dos dados, conforme metodologia utilizada por (VETTORATO, 2003).

#### **5.4.2 Análise de correlação entre variáveis**

A análise da correlação entre os parâmetros medidos pelo sensor em estudo (resistência e capacitância elétrica) em relação aos atributos do solo amostrados foi realizada com os seguintes coeficientes de correlação: de Pearson, que é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis, realizada no programa Microsoft Excel 2003; de Spearman, que dispensa a normalidade dos dados, realizada no programa Statplus Professional versão 4.6 (2007). Foram realizadas análises de regressão dos dados com as respectivas linhas de tendência. E uma das formas de estender a aplicabilidade do modelo da análise de regressão foi aplicar a transformação em uma das variáveis ou ambas, antes de ajustar o modelo. Os dados foram transformados de forma a se obter novos valores, na tentativa de melhorar os resultados das correlações. Foram calculadas, com e sem a transformação dos valores das variáveis e os gráficos de regressão dos dados foram apresentados sem a transformação dos valores. Essa análise também foi realizada utilizando os recursos do programa Microsoft Excel 2003.

#### **5.4.3 Análise geoestatística**

Os dados obtidos no campo e os valores estimados pelas medidas elétricas (resistência e capacitância elétrica) foram submetidos à análise geoestatística. A análise geoestatística foi realizada considerando todos os dados amostrados em campo e

também para os valores estimados pelos valores de resistência e capacitância elétrica, para cada atributo do solo estudado. A análise da variabilidade e dependência espacial foi elaborada pelas funções do variograma. Com o objetivo de facilitar a visualização e interpretação da variabilidade espacial, são mostradas graficamente as estimativas das semivariâncias  $\gamma(h)$  em função da distância  $h$ . Para o cálculo das estimativas das semivariâncias e dos parâmetros dos modelos teóricos ajustados foi utilizado o programa geoestatístico GS+. Para definir o grau de dependência espacial, através dos parâmetros do variograma, aplicou-se o índice de dependência espacial, proposto pelo próprio programa GS+.

Para se realizar o estudo da variabilidade e da dependência espacial, para os valores dos atributos do solo, foi necessário que cada amostra fosse associada à sua respectiva posição relativa ou coordenada espacial. Assim, neste estudo, as coordenadas de campo utilizadas foram as coordenadas UTM – “Universal Transversa de Mercator”, para cada ponto amostrado. A análise espacial dos dados foi realizada por intermédio do programa GS+ “Geoestatistical for Environmental Sciences” Versão 7.0 (2004), que utiliza os valores das variáveis em estudo, com suas respectivas coordenadas de campo para a construção dos variogramas. Por meio da geoestatística, foram analisadas a estrutura e a dependência espacial dos dados, identificadas pela forma do variograma com os respectivos parâmetros.

As análises espaciais foram executadas pelo módulo “Análise da semivariância” do programa GS+. Para realizar o ajuste, dos variogramas teóricos aos variogramas experimentais, foi utilizada a seleção padrão do programa GS+, que faz o ajuste automático do variograma teórico ao experimental, de modo que a curva que melhor se ajustar aos pontos obtidos represente a magnitude, alcance e intensidade da variabilidade espacial da variável estudada. O programa utiliza a soma dos quadrados dos resíduos (SQR) como índice de avaliação do erro de ajuste. Conforme citado por Zimback (2001), é a melhor medida de avaliação.

A construção do variograma foi efetuada para um atributo do solo de cada vez, sendo que ao final se obteve um conjunto de resultados, provenientes da análise, para cada atributo estudado. Para os dados estudados foram somente verificados os variogramas isotrópicos, onde a variável estudada apresenta comportamento semelhante em todas as direções que, segundo Zimback (2001), é suficiente para descrever a variabilidade da variável no campo.

Após a seleção dos variogramas das variáveis em estudo que apresentaram a dependência ou correlação espacial, as estimativas para os pontos não observados em qualquer posição da área estudada foram obtidas pela técnica da interpolação dos dados. O método de interpolação de dados utilizado foi a krigagem, citado por Batista (2002) como o melhor método de interpolação para dados de atributos do solo.

A krigagem dos valores dos atributos do solo foi efetuada pelo módulo Interpolação – Krigagem, do software GS+. No presente estudo as amostras foram simples, e, portanto, a krigagem utilizada foi a pontual, efetuada segundo o programa GS+ que, antes de realizar a krigagem propriamente dita, fornece algumas opções para melhorar o processo de interpolação e que, em geral, são ajustados automaticamente pelo programa. Algumas das opções de escolha são o número de vizinhos e a distância de abrangência da amostras usada na interpolação.

Segundo Goovaerts (1997), um fator que afeta o cálculo de precisão do método de interpolação é o número de amostragens vizinhas usadas para a estimação. O número de amostras foi fixado em 16, que é o número de amostras escolhido automaticamente pelo programa GS+ e, conforme Kravchenko e Bullock (1999), é o que melhor estima o número de pontos. A distância máxima para o cálculo da semivariância deve ser no máximo igual à máxima distância de coleta da amostra. O GS+ adota como critério inicial 80% do valor da distância máxima entre dois pontos.

## **5.5 Geração dos mapas**

A visualização dos resultados foi feita na forma de mapas bidimensionais, representativos da distribuição espacial dos valores dos atributos do solo em estudo, com o auxílio do programa Surfer versão 8.0 "Surface Mapping System" da Golden Software, Inc.

A finalidade dos mapas foi de auxiliar na análise das correlações dos dados, para possibilitar a verificação de com quais propriedades do solo o sensor se correlacionou melhor.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1 Sensor de medidas elétricas**

O sensor do presente estudo resultou num sistema mecânico e eletrônico para a realização de sondagens dos atributos do solo no campo, de forma simples, rápida e de baixo custo. Sua principal vantagem é a de poder ser inserido no solo de forma vertical, como uma lança, e retirado com facilidade, proporcionando uma deformação mínima do solo (pequeno orifício de cerca de 2,2 cm de diâmetro). Como desvantagem, observa-se que a introdução do sensor em solos compactados necessita de um instrumento pré-furador do solo, e a coleta das informações vindas do sensor e do GPS deve ser anotada em uma planilha. Assim, novos estudos devem ser desenvolvidos para aprimorar essas observações.

## 6.2 Análise exploratória dos dados

A análise exploratória dos dados foi realizada para cada uma das variáveis estudadas, obtendo-se os valores da média, moda, mediana, valor mínimo e máximo e desvio padrão, utilizando-se o programa Microsoft Excel 2003, como mostra a Tabela 1.

**Tabela 1.** Resultados da análise exploratória dos dados.

	Média	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Resistência elétrica (Ohm)	2483	2200	2500	750	8000	1311
Capacitância elétrica (micro-farad)	0,75	0,693	0,899	0,172	2,85	0,416
Umidade (%)	15,36	15,39	12,18	2,61	23,38	3,76
Condutividade elétrica (Siemens/metro)	0,24	0,23	0,19	0,11	0,46	0,07
pH	4,7	4,7	4,5	4,1	7,3	0,5
M.O (g.dm <sup>-3</sup> )	27	27	24	15	41	6
Presina (mg.dm <sup>-3</sup> )	25	20	33	6	89	15
H+Al (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	52	52	54	11	87	14
K (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	2,9	2,7	1,9	1,1	8	1,3
Ca (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	26	24	25	8	174	20
Mg (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	11	8	7	2	112	14
SB (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	39	34	-	14	291	34
CTC (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	91	89	-	56	302	28
V%	41	41	-	14	96	14
Areia (g/Kg)	585	598	500	375	801	116
Silte (g/Kg)	94	88	90	48	389	49
Argila (g/Kg)	321	311	394	147	499	91

Com os valores mínimos e máximos dos parâmetros analisados, podem-se observar os intervalos de variação apresentados pelos atributos do solo. No presente estudo, o desvio padrão apresenta grande amplitude de variação para a maioria dos parâmetros analisados, concordando com o trabalho de (VETTORATO, 2003).

Foi observado que os valores máximos dos parâmetros estudados ficaram bem acima da média e da mediana para todos os atributos do solo, como pode ser verificado na Tabela 1, demonstrando que possivelmente não foram amostras com erro de análise ou de leitura em campo.

### **6.3 Análise de correlação entre as variáveis**

#### **6.3.1 Análise de correlação linear de Pearson**

Os resultados das análises de correlação entre os atributos do solo e a resistência elétrica do solo podem ser visualizados na Tabela 2. Os cálculos foram feitos através do coeficiente de correlação linear de Pearson, que é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis. Essa análise foi realizada no programa Microsoft Excel 2003, considerando: primeiramente, todas as amostras (Total); segundo, retirando as amostras de resistência elétrica que estavam fora do desvio padrão (R); terceiro, retirando as amostras dos atributos do solo em análise que estavam fora do desvio padrão (A.S); e, em quarto, retirando as amostras de ambos os casos que estavam fora do desvio padrão (R+A.S).

**Tabela 2.** Resultados da análise de correlação linear de Pearson entre a resistência elétrica e os atributos do solo.

	Total	R	A.S	R+A.S
Capacitância	-0,74	-0,88	-0,90	-0,91
Umidade	-0,47	-0,42	-0,54	-0,40
Condutividade	0,09	0,03	0,15	0
pH	-0,46	-0,42	-0,53	-0,45
M.O	-0,53	-0,34	-0,50	-0,28
Presina	0,26	0,04	0,08	0,15
H+Al	0,15	0,22	0,09	0,05
K	-0,38	-0,42	-0,18	-0,15
Ca	-0,40	-0,50	-0,60	-0,50
Mg	-0,32	-0,34	-0,60	-0,39
SB	-0,40	-0,50	-0,60	-0,50
CTC	-0,40	-0,40	-0,50	-0,30
V%	-0,50	-0,50	-0,50	-0,30
Areia	0,63	0,40	0,40	0,29
Silte	-0,42	-0,52	-0,30	-0,34
Argila	-0,58	-0,45	-0,32	-0,25

Total = considerando todas as 81 amostras; R = considerando somente as amostras de resistência elétrica dentro do desvio padrão; A.S = considerando somente as amostras dos atributos do solo em referência dentro do desvio padrão; R+A.S = considerando somente as amostras de ambos os casos dentro do desvio padrão.

Pode-se verificar, na Tabela 2, que 69% dos maiores valores das correlações ficaram nas análises de correlações onde foram considerados os atributos do solo somente dentro do desvio padrão e 31% dos melhores resultados ficaram nas correlações considerando todas as amostras.

Segundo Doria Filho (1999), que classifica os coeficientes de correlação linear entre variáveis, como perfeito, quando índice de correlação for (=1), forte ( $> 0,75$ ), médio ( $> 0,5$ ), fraco ( $< 0,5$ ) e inexistente (=0), observa-se que os resultados da Tabela 2 apresentaram uma forte correlação entre a resistência elétrica e a capacitância elétrica, uma média correlação entre resistência elétrica e os atributos do solo: umidade, pH, M.O., Ca, Mg, SB, areia, silte e argila e correlações fracas entre resistência elétrica e as variáveis condutividade elétrica, Presina, H+Al, K, CTC e V%.

Da mesma forma, foram aplicados os coeficientes de correlação linear de Pearson entre a capacitância elétrica e os demais atributos do solo, que podem ser visualizados na Tabela 3. Consideraram-se, primeiramente, todas as amostras (Total); segundo, retirando as amostras de capacitância elétrica que estavam fora do desvio padrão (C); terceiro, retirando as amostras dos atributos do solo em análise que estavam fora do desvio padrão (A.S); e, em quarto, retirando as amostras de ambos os casos que estavam fora do desvio padrão (C+A.S).

**Tabela 3.** Resultados da análise de correlação linear de Pearson entre a capacitância elétrica e os atributos do solo.

	Total	C	A.S	C+A.S
Resistência	-0,74	-0,88	-0,90	-0,91
Umidade	0,43	0,41	0,45	0,43
Condutividade	-0,01	-0,04	-0,04	-0,08
pH	0,78	0,50	0,61	0,51
M.O	0,44	0,42	0,40	0,44
Presina	0,05	0,06	0,09	0,09
H+Al	-0,43	-0,19	-0,17	-0,11
K	0,45	0,50	0,10	0,17
Ca	0,80	0,61	0,69	0,67
Mg	0,75	0,55	0,66	0,63
SB	0,80	0,60	0,70	0,70
CTC	0,70	0,40	0,50	0,50
V%	0,70	0,50	0,63	0,50
Areia	-0,64	-0,56	-0,44	-0,41
Silte	0,71	0,38	0,71	0,50
Argila	0,44	0,58	0,33	0,56

Total = considerando todas as 81 amostras; C = considerando somente as amostras de capacitância elétrica dentro do desvio padrão; A.S = considerando somente as amostras dos atributos do solo em referência dentro do desvio padrão; C+A.S = considerando somente as amostras de ambos os casos dentro do desvio padrão.

Foi observado, na Tabela 3, que as maiores correlações totalizaram 62,5% das análises onde foram consideradas todas as amostras. Conforme classificação de Doria Filho (1999), foram verificados todos os resultados da Tabela 3, e apresentaram uma forte correlação entre a capacitância elétrica e os fatores: resistência elétrica, pH, Ca, Mg e SB. Resultaram em correlações médias com os fatores: CTC, V%, areia, silte e argila e correlações fracas com seguintes fatores: umidade, condutividade elétrica, M.O, Presina, H+Al e K.

Diante dos resultados apresentados na Tabela 2 e Tabela 3, convencionou-se utilizar para as demais análises do presente estudo todas as amostras dos atributos do solo levantados em campo, porque 67% dos resultados que tiveram forte índice de correlação consideraram em suas análises todas as amostras do experimento.

### **6.3.2 Análise de regressão dos dados**

Os melhores ajustes de correlação entre a condutividade elétrica e algumas variáveis do solo foram conseguidos por Maia et al. (2001) utilizando-se da análise de regressão dos dados. Na Tabela 4, pode-se observar qual o tipo de transformação aplicada nas variáveis, o modelo da linha de tendência e o índice de correlação entre a resistência elétrica e os atributos do solo.

**Tabela 4.** Resultados dos coeficientes de correlação entre resistência elétrica e atributos do solo com transformação de valores e análise de regressão com a linha de tendência.

	T.A	T.R	Linha de tendência	r
Umidade	-	Log	Potência	0,50
Condutividade	Raiz	-	Linear	0,12
pH	Log	Log	Polinomial	0,63
M.O	Log	-	Exponencial	0,60
Presina	Raiz	-	Polinomial	0,46
H+Al	Log	Log	Polinomial	0,44
K	Log	Log	Exponencial	0,46
Ca	Log	Log	Potência	0,70
Mg	Log	Log	Exponencial	0,72
SB	Log	Log	Potência	0,73
CTC	Log	Log	Polinomial	0,60
V%	Raiz	Log	Polinomial	0,60
Areia	-	Log	Linear	0,66
Silte	Log	Log	Potência	0,61
Argila	Log	-	Exponencial	0,64

T.A = Transformação do atributos do solo; T.R = Transformação da resistência elétrica; r = Coeficiente de correlação considerando a linha de tendência entre resistência elétrica e atributo do solo; Log = Valor transformado para logarítmico; Raiz = Valor transformado para raiz quadrada

Na Tabela 5, pode-se observar qual o tipo de transformação aplicada às variáveis, o modelo da linha de tendência e o índice de correlação entre a capacitância elétrica e os atributos do solo.

**Tabela 5.** Resultados dos coeficientes de correlação entre capacitância elétrica e atributos do solo com transformação de valores e análise de regressão com a linha de tendência.

	T.A	T.C	Linha de Tendência	r
Umidade	-	Log	Polinomial	0,49
Condutividade	-	Log	Polinomial	0,12
pH	Raiz	-	Linear	0,79
M.O	Log	Log	Polinomial	0,60
Presina	-	Log	Polinomial	0,39
H+Al	Log	-	Polinomial	0,65
K	Log	Log	Exponencial	0,50
Ca	Raiz	-	Polinomial	0,87
Mg	Log	-	Polinomial	0,82
SB	Raiz	-	Polinomial	0,89
CTC	Raiz	-	Polinomial	0,85
V%	-	Raiz	Linear	0,73
Areia	-	Log	Polinomial	0,69
Silte	Raiz	-	Linear	0,71
Argila	Log	Log	Polinomial	0,64

T.A = Transformação do atributos do solo; T.C = Transformação da capacitância elétrica; r = Coeficiente de correlação considerando a linha de tendência entre capacitância elétrica e atributo do solo; Log = Valor transformado para logarítmico; Raiz = Valor transformado para raiz quadrada

### 6.3.3 Análise comparativa dos coeficientes de correlação

Na Tabela 6 são apresentados alguns cálculos de coeficientes de correlação entre resistência elétrica e os atributos do solo. Novamente foram relacionados os resultados da Tabela 2 (coeficientes de Pearson) e os índices de correlação da Tabela 4 (análise de regressão com transformação das variáveis). E foram acrescentados os resultados da análise de regressão com a linha de tendência sem a transformação dos valores das variáveis.

Também se acrescentaram os coeficientes de correlação de Spearman, obtidos com o do programa Statplus Professional versão 4.6 (2007). Conforme se pôde verificar nos trabalhos de Moretti (2006), Almeida et al. (2005) e Menegatti e Molin (2001), é um dos coeficientes de correlação muito utilizado em estudos relacionados à área da agricultura.

**Tabela 6.** Resultados dos coeficientes de correlações entre resistência elétrica e os atributos do solo.

	Spearman	Pearson	L.T.1	L.T.2
Umidade	-0,54	-0,47	0,50	0,50
Condutividade	0,07	0,09	0,12	0,12
pH	-0,59	-0,46	0,58	0,63
M.O	-0,47	-0,53	0,59	0,60
Presina	0,07	0,26	0,46	0,46
H+Al	0,20	0,15	0,28	0,44
K	-0,41	-0,38	0,47	0,46
Ca	-0,67	-0,40	0,69	0,70
Mg	-0,65	-0,32	0,68	0,72
SB	-0,69	-0,40	0,70	0,73
CTC	-0,50	-0,40	0,57	0,60
V%	-0,56	-0,50	0,59	0,60
Areia	0,63	0,63	0,66	0,66
Silte	-0,53	-0,42	0,60	0,61
Argila	-0,56	-0,58	0,63	0,64

L.T.1 = Linha de tendência sem transformação dos valores

L.T.2 = Linha de tendência com transformação dos valores

Em pesquisa realizada por Banton et al. (1997), verificou-se que o coeficiente de correlação entre o teor de argila e a resistência elétrica do solo foi de 0,64 e também se encontrou coeficiente de correlação da resistência elétrica do solo com o teor de matéria orgânica com índice de 0,65. Resultados semelhantes foram obtidos no estudo em

questão para argila e matéria orgânica, respectivamente de 0,63 e 0,59. Já em pesquisa realizada na Dinamarca, por Dalgaard et al. (2001), concluíram que a condutividade elétrica do solo explicava 79% da variabilidade do teor de argila.

Menegatti e Molin (2001), utilizando um sensor de resistência elétrica por contato, obtiveram as correlações com valores de argila (0,32); areia (-0,26) e CTC (-0,25). No estudo em questão foram obtidos os seguintes valores de correlação com argila (0,63); areia (-0,66) e CTC (-0,57). Em outro trabalho desenvolvido por Molin et al. (2005), verificou-se que a correlação entre a condutividade elétrica do solo, medida por indução com o teor de argila, foi de apenas 15% para camada de 0 a 20 cm; e para camada mais profunda, de 20 cm a 40 cm, a correlação atingiu 33%. Embora fossem medidos por outro tipo de equipamento, têm seus valores como referencial de comparação com o sensor analisado pelo estudo em questão.

Na pesquisa realizada por Harstock et al. (2000), encontraram-se boas correlações entre a condutividade elétrica e os teores de cálcio e magnésio.

Castro (2004) também verificou a correlação da condutividade elétrica do solo com alguns atributos físico-químicos do solo, notadamente elevada com o conteúdo de argila em uma das áreas experimentais.

Da mesma forma, Faulin (2005) constatou, em uma das áreas experimentais onde as amplitudes dos teores de argila eram maiores, que a variabilidade espacial da condutividade elétrica mostrou ser dependente do teor de água e conseqüentemente do teor de argila. Em outra área, o teor de água não apresentou influência na variabilidade espacial da condutividade elétrica.

A condutividade elétrica medida por sensor de contato refletiu adequadamente a variação dos teores de argila do Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto, para uso na definição de zonas de manejo (Machado et al., 2006).

Para Grego et al. (2006), a variabilidade espacial do teor de água e da produtividade da mamona cultivada sob sistema de plantio direto pode ser atribuída aos mesmos fatores que afetam a condutividade elétrica do solo.

Becegato (2005) também verificou em seu trabalho o que foi observado no estudo em referência, ou seja, correlações negativas entre a argila e a resistência elétrica do solo, evidenciando que quanto maiores os teores de argila e umidade do solo,

menor será a resistência elétrica do solo, e, portanto, maior é a facilidade com que a corrente elétrica transita por tal meio, ao contrário do solo mais arenoso, que impõe maior resistência à passagem da corrente.

A Tabela 7 apresenta alguns coeficientes de correlação entre capacitância elétrica e os atributos do solo da mesma forma como se confeccionou a Tabela 6.

**Tabela 7.** Resultados dos coeficientes de correlações entre capacitância elétrica e os atributos do solo.

	Spearman	Pearson	L.T.1	L.T.2
Umidade	0,55	0,43	0,50	0,49
Condutividade	-0,01	-0,01	0,04	0,12
pH	0,65	0,78	0,83	0,79
M.O	0,54	0,44	0,57	0,60
Presina	-0,05	-0,05	0,37	0,39
H+Al	-0,22	-0,43	0,54	0,65
K	0,44	0,45	0,50	0,50
Ca	0,74	0,80	0,93	0,87
Mg	0,71	0,75	0,93	0,82
SB	0,76	0,80	0,94	0,89
CTC	0,56	0,70	0,89	0,85
V%	0,62	0,70	0,73	0,73
Areia	-0,68	-0,64	0,69	0,69
Silte	0,57	0,71	0,75	0,71
Argila	0,62	0,48	0,63	0,64

L.T.1 = Linha de tendência sem transformação dos valores

L.T.2 = Linha de tendência com transformação dos valores

Verificou-se, nas Tabelas 6 e 7, o que foi observado nos trabalhos realizados por Rocha (2004) e Almeida et al. (2005). Os coeficientes de correlação de Pearson e Spearman resultaram valores muito semelhantes.

A Tabela 8 apresenta os melhores índices de correlação entre os atributos do solo e as medidas elétricas com seus respectivos tipos de análise e se foram ou não aplicadas transformações de seus valores.

**Tabela 8.** Resultado dos melhores coeficientes de correlações entre as medidas elétricas e os atributos do solo.

	Tipo da análise	Transformação	Medida elétrica	Índice de correlação
Umidade	Spearman	Sem	Capacitância	0,55
Condutividade	Regressão	Com	Capacitância	0,12
pH	Regressão	Sem	Capacitância	0,83
M.O	Regressão	Com	Capacitância e resistência	0,60
Presina	Regressão	Sem	Resistência	0,46
H+Al	Regressão	Com	Capacitância	0,65
K	Regressão	Com e sem	Capacitância	0,50
Ca	Regressão	Sem	Capacitância	0,93
Mg	Regressão	Sem	Capacitância	0,93
SB	Regressão	Sem	Capacitância	0,94
CTC	Regressão	Sem	Capacitância	0,89
V%	Regressão	Com e sem	Capacitância	0,73
Areia	Regressão	Com e sem	Capacitância	0,69
Silte	Regressão	Sem	Capacitância	0,75
Argila	Regressão	Com	Capacitância	0,64

Na Tabela 8, pode-se notar que os melhores resultados de correlação foram obtidos entre o teor de cálcio com a capacitância elétrica, pela análise de regressão, sem a transformação de valores, com índice de 0,93; entre o teor de magnésio com a capacitância elétrica, pela análise de regressão, sem transformação de valores, com índice de 0,93; e entre a soma de bases com a capacitância elétrica, pela análise de regressão, sem transformação de valores, com índice de 0,94.

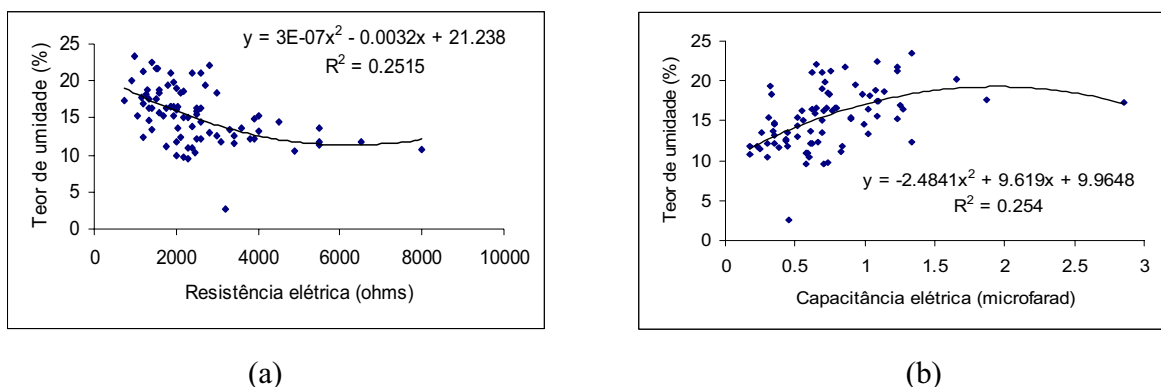
Analisando os resultados se observa que dos 15 atributos do solo estudados no experimento, os 11 melhores índices de correlação foram calculados sem a transformação de seus valores. As transformações podem ser muito úteis em algumas circunstâncias, mas devem ser consideradas como um último recurso, uma vez, que quando as variáveis são transformadas, os coeficientes deixam de ter interpretações diretas e os resultados a que se chega para as variáveis transformadas não se podem converter facilmente para as variáveis originais. Assim, diante desses resultados, o presente trabalho utilizou para todas as seguintes análises somente os valores das variáveis sem a transformação dos seus dados.

#### **6.3.4 Análise dos coeficientes de determinação e dispersão dos dados**

Com a finalidade de estimar os valores dos atributos do solo por meio dos valores das medidas elétricas (resistência e capacitância) levantados em campo, foi realizada a análise de regressão com o gráfico da linha de tendência, apresentando a expressão matemática da relação e o coeficiente de determinação das variáveis, sem a transformação do valor das mesmas. O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) é o índice que resulta a percentagem de variação de uma variável que é explicada estatisticamente pela variação na outra variável. Para o cálculo destes parâmetros foi utilizado o programa Microsoft Excel 2003 e os resultados podem ser visualizados nas Figuras de 11 a 25.

Segundo Vanni (1998), o coeficiente de determinação pode ser interpretado pelo sentido relativo quando assumir valores entre 0 e 1, revelando um percentual de ajustamento, onde um ajustamento entre 0,65 e 0,75 pode ser considerado regular, entre 0,75 e 0,85 pode ser considerado bom e acima de 0,85 deve ser considerado ótimo. Abaixo de 0,6 demonstra que a variável independente “x” não explica com segurança a variação de “y”.

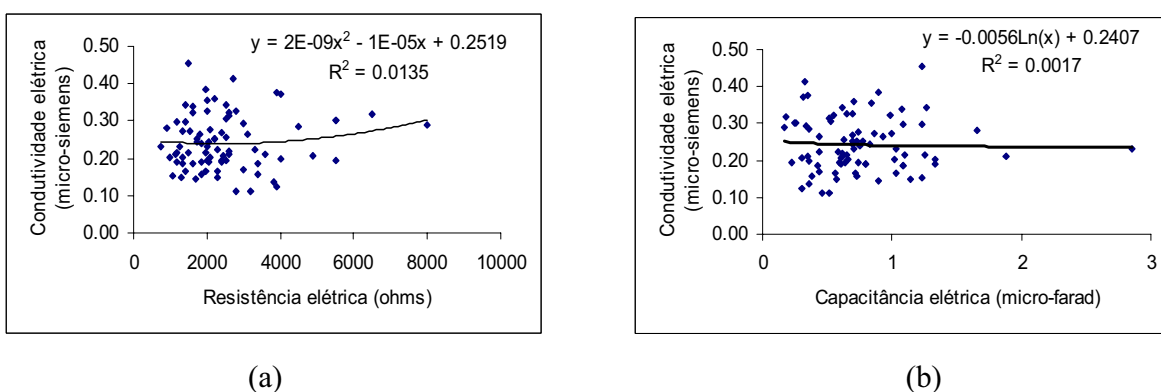
Assim, pode-se observar na Figura 11 que os coeficientes de determinação de ambos os gráficos não explicam com segurança as variações do teor de umidade em função das medidas elétricas, e a distribuição dos pontos nos gráficos se apresenta muito dispersa, indicando uma fraca correlação entre as variáveis, segundo a classificação adotada por (DORIA FILHO, 1999).



**Figura 11.** Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de umidade com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).

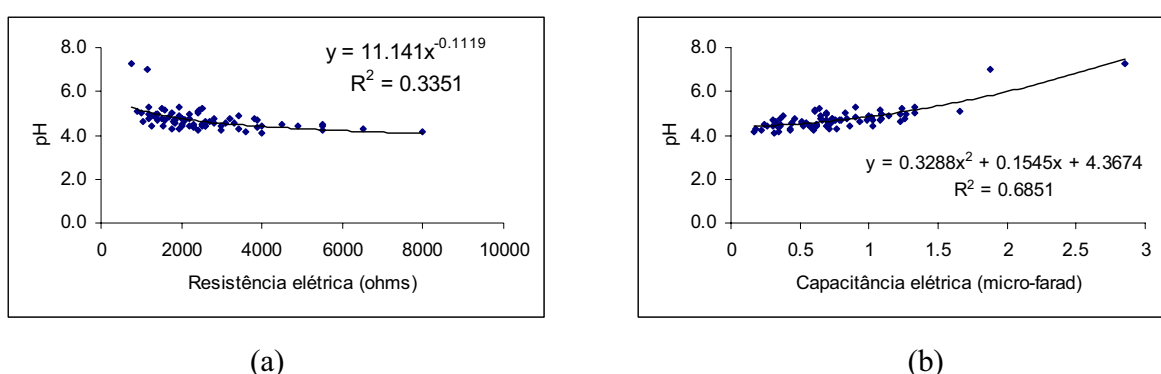
Adotou-se para as demais análises dos coeficientes de determinação e dispersão dos dados à mesma metodologia utilizada na Figura 11, ou seja, coeficiente de determinação conforme Vanni (1998) e índice de correlação segundo (DORIA FILHO, 1999).

Observa-se na Figura 12, que os coeficientes de determinação de ambos os gráficos não explicam com segurança as variações do índice de condutividade elétrica em função das medidas elétricas e que a distribuição dos pontos nos gráficos se apresenta muito dispersa, indicando quase uma inexistência de correlação entre as variáveis.



**Figura 12.** Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o índice de condutividade elétrica com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).

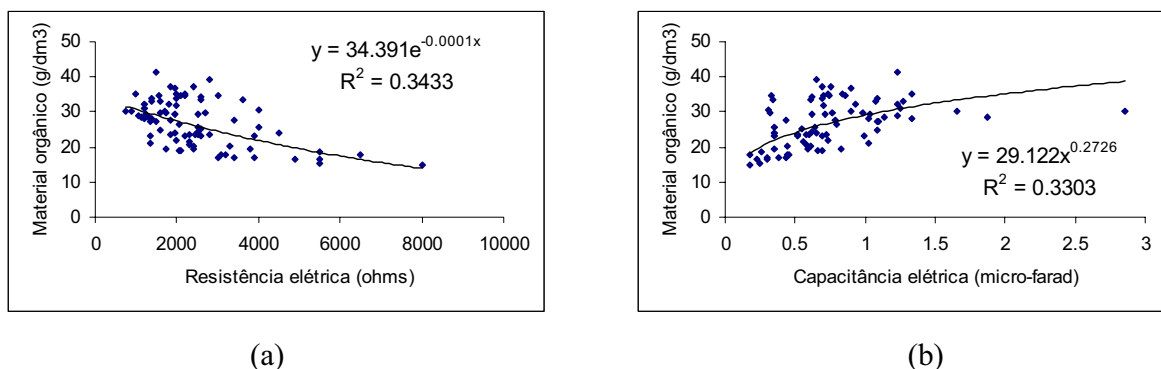
Verifica-se na Figura 13 (a) que o coeficiente de determinação em relação à resistência elétrica não explica com segurança as variações do índice de pH e a distribuição dos pontos no gráfico se apresenta muito dispersa, indicando uma média correlação entre as variáveis. Na Figura 13 (b) o coeficiente de determinação em relação à capacitância elétrica explica com regular segurança as variações do índice de pH e a distribuição dos pontos no gráfico se apresenta quase sem dispersão, indicando uma forte correlação entre as variáveis.



**Figura 13.** Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o índice de pH com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).

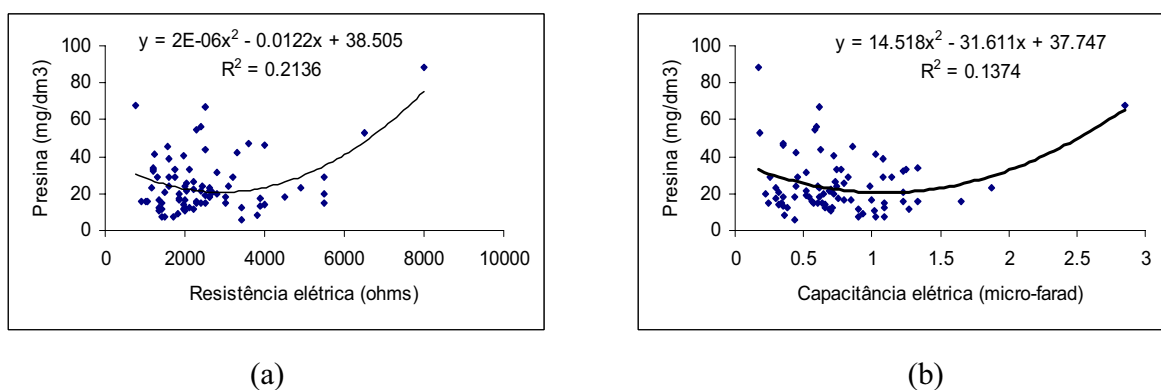
Na Figura 14, os coeficientes de determinação de ambos os gráficos não explicam com segurança as variações do teor de material orgânico em função das medidas elétricas e a distribuição dos pontos nos gráficos se apresenta dispersa, indicando uma média correlação entre as variáveis.

Analisando a Figura 14, nota-se que quanto maior o índice de material orgânico, menor o índice de resistência elétrica do solo, ou seja, maior a condutividade elétrica, se obtendo um resultado semelhante aos obtidos pelos autores Benites e Mendonça (1998) e Oliveira et al. (2002), que verificaram em seus trabalhos que a elevação do teor de carbono orgânico gerou aumento na condutividade elétrica do solo.



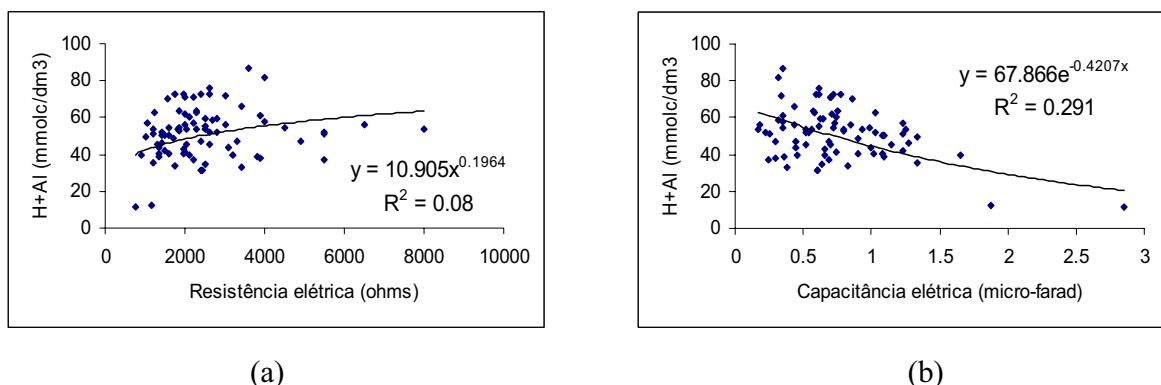
**Figura 14.** Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de material orgânico com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).

Pode-se observar na Figura 15 que os coeficientes de determinação de ambos os gráficos não explicam com segurança as variações do teor de Presina em função das medidas elétricas e a distribuição dos pontos nos gráficos se apresenta dispersa, indicando uma fraca correlação entre as variáveis.



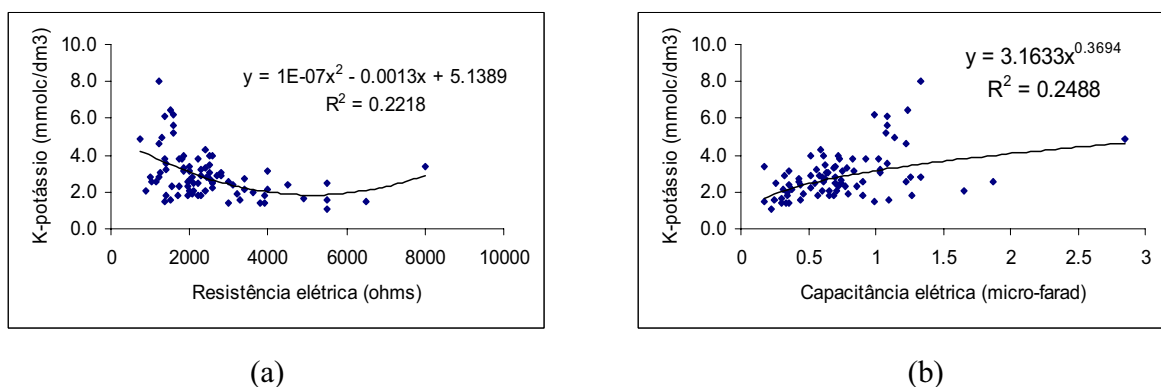
**Figura 15.** Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor Presina com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).

Observa-se, na Figura 16, que os coeficientes de determinação de ambos os gráficos não explicam com segurança as variações do teor de H+Al em função das medidas elétricas e a distribuição dos pontos nos gráficos se apresenta dispersa, indicando uma fraca correlação entre as variáveis.



**Figura 16.** Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de H+Al com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).

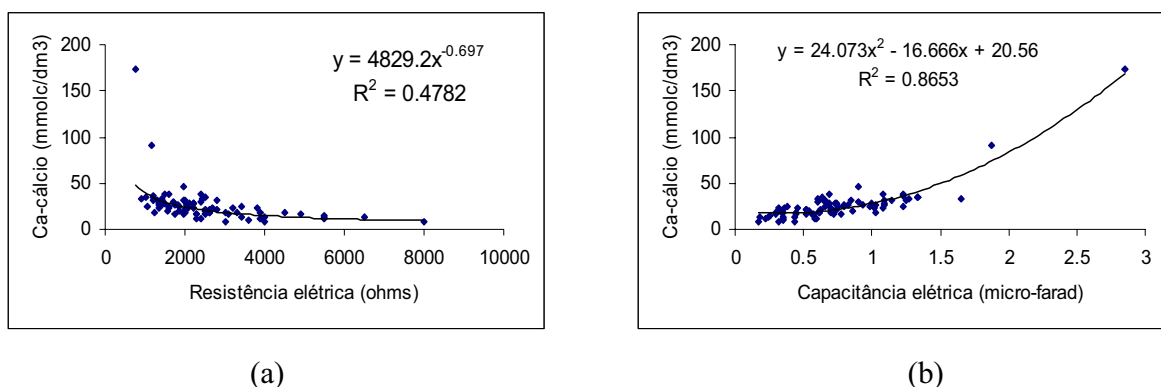
Pode-se verificar na Figura 17 que os coeficientes de determinação de ambos os gráficos não explicam com segurança as variações do teor de potássio em função das medidas elétricas e a distribuição dos pontos nos gráficos se apresenta dispersa, indicando uma fraca correlação entre as variáveis.



**Figura 17.** Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de potássio com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).

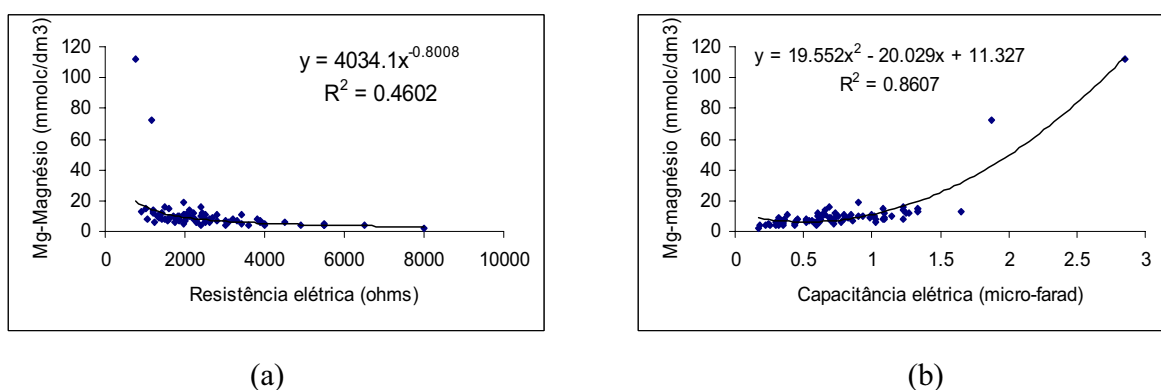
A Figura 18 (a) mostra que o coeficiente de determinação em relação à resistência elétrica não explica com segurança as variações do índice de cálcio e a distribuição dos pontos no gráfico se apresenta pouco dispersa, indicando uma média correlação entre as variáveis. Na Figura 18 (b), o coeficiente de determinação em relação à capacitância elétrica

explica com ótima segurança as variações do índice de cálcio e a distribuição dos pontos no gráfico se apresenta quase sem dispersão, indicando uma forte correlação entre as variáveis.



**Figura 18.** Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de cálcio com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).

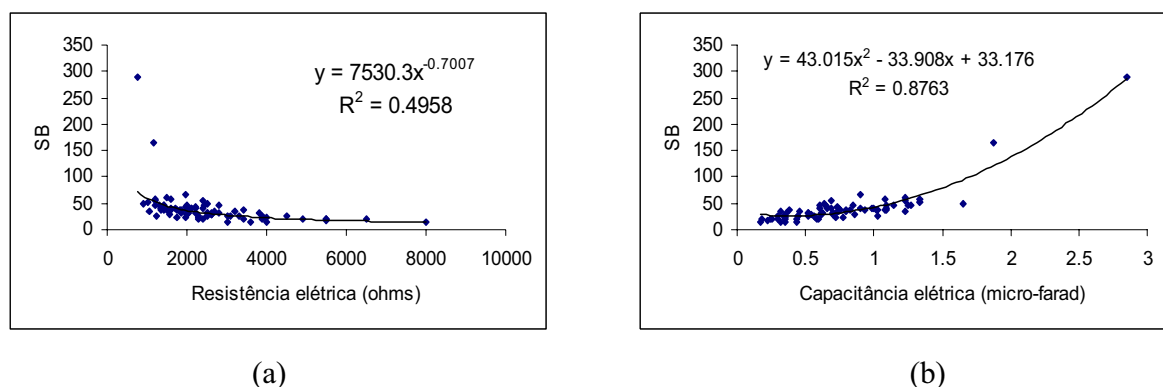
Observa-se na Figura 19 (a) que o coeficiente de determinação em relação à resistência elétrica não explica com segurança as variações do índice de magnésio e a distribuição dos pontos no gráfico se apresenta pouco dispersa, indicando uma média correlação entre as variáveis. Na Figura 19 (b) o coeficiente de determinação em relação à capacitância elétrica explica com ótima segurança as variações do índice de magnésio e a distribuição dos pontos no gráfico se apresenta quase sem dispersão, indicando uma forte correlação entre as variáveis.



**Figura 19.** Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de magnésio com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).

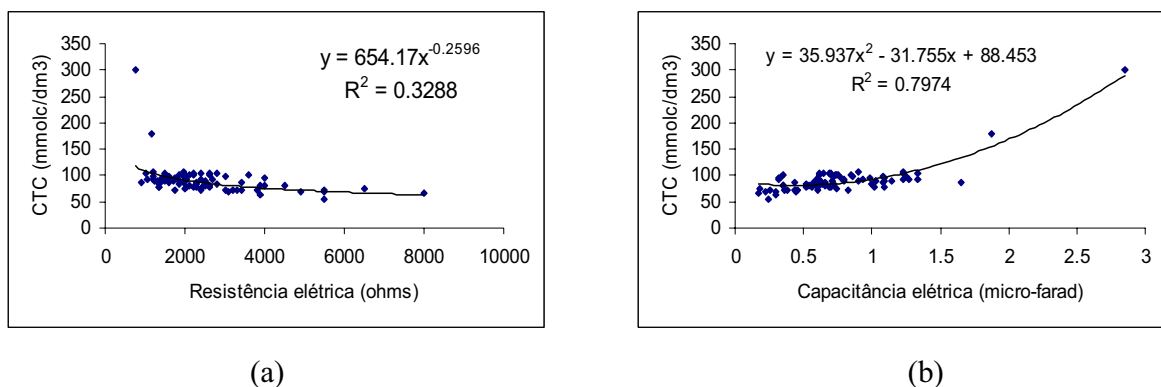
Verificou-se nos resultados apresentados nas Figuras 17, 18 e 19, respectivamente, que quando se aumenta o valor dos teores de potássio, cálcio e magnésio o valor da resistência elétrica do solo se reduz. Resultados semelhantes foram verificados por Caminha Junior et al. (2000), onde baixos valores de resistividade elétrica foram justificados pelas altas concentrações de Ca, Mg e, principalmente, do potássio presente no solo.

Pode-se observar na Figura 20 (a) que o coeficiente de determinação em relação à resistência elétrica não explica com segurança as variações do índice de SB e a distribuição dos pontos no gráfico se apresenta pouco dispersa, indicando uma média correlação entre as variáveis. Na Figura 20 (b) o coeficiente de determinação em relação à capacitância elétrica explica com ótima segurança as variações do índice de SB e a distribuição dos pontos no gráfico se apresenta quase sem dispersão, indicando uma forte correlação entre as variáveis.



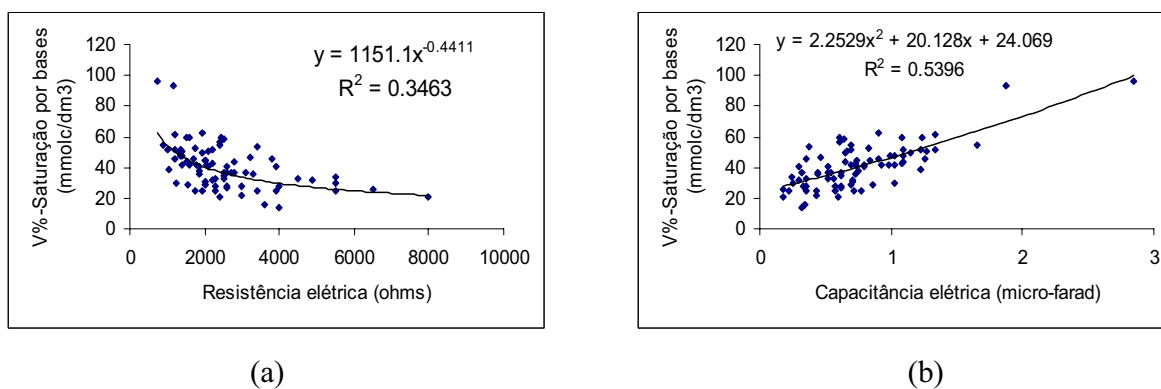
**Figura 20.** Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o índice de solução de bases com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).

Conforme a Figura 21 (a) pode-se visualizar que o coeficiente de determinação em relação à resistência elétrica não explica com segurança as variações do índice de CTC e a distribuição dos pontos no gráfico se apresenta pouco dispersa, indicando uma média correlação entre as variáveis. Na Figura 21 (b), o coeficiente de determinação em relação à capacitância elétrica explica com boa segurança as variações do índice de CTC e a distribuição dos pontos no gráfico se apresenta quase sem dispersão, indicando uma forte correlação entre as variáveis.



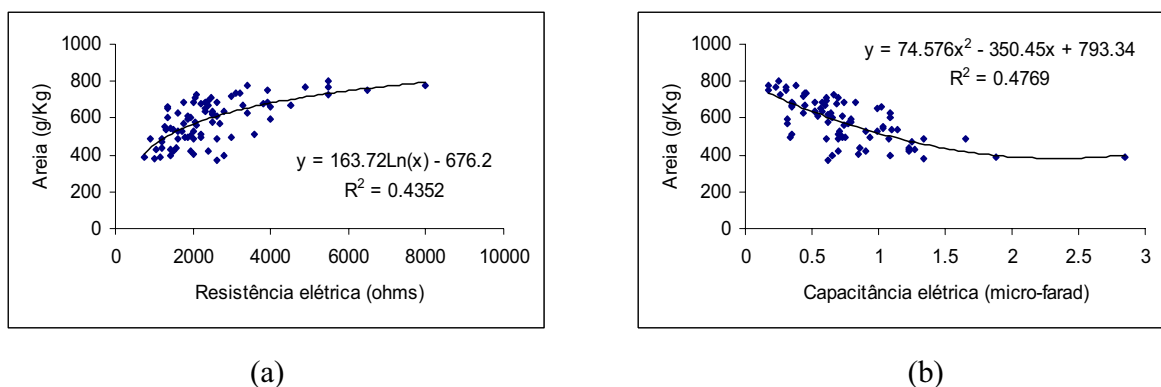
**Figura 21.** Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o índice de CTC com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).

Na Figura 22 nota-se que os coeficientes de determinação de ambos os gráficos não explicam com segurança as variações do índice de V% em função das medidas elétricas e a distribuição dos pontos nos gráficos se apresenta pouco dispersa, indicando uma média correlação entre as variáveis.



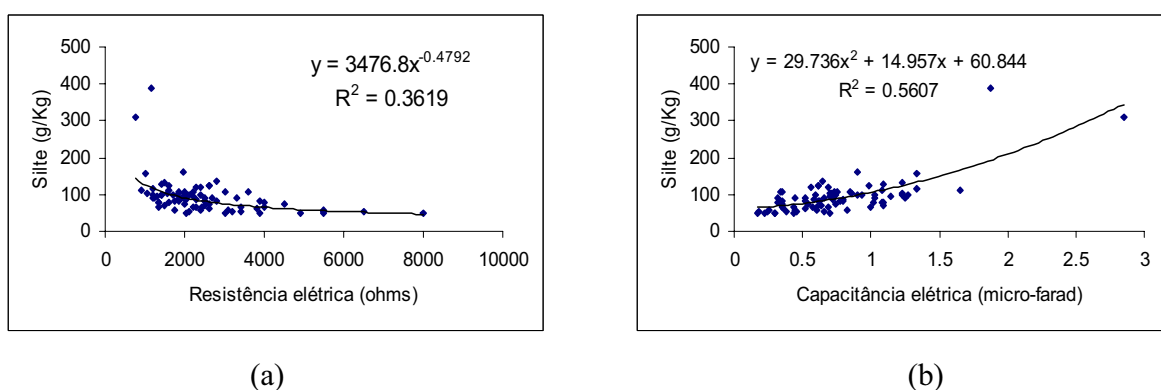
**Figura 22.** Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o índice de V% com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).

Pode-se observar na Figura 23 que os coeficientes de determinação de ambos os gráficos não explicam com segurança as variações do teor de areia em função das medidas elétricas e a distribuição dos pontos nos gráficos se apresenta pouco dispersa, indicando uma média correlação entre as variáveis.



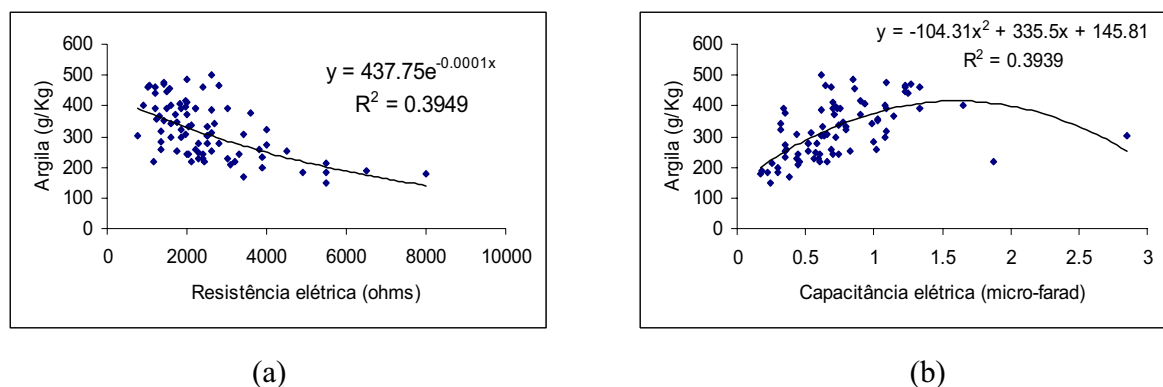
**Figura 23.** Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de areia com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).

A Figura 24 mostra que os coeficientes de determinação de ambos os gráficos não explicam com segurança as variações do teor de silte em função das medidas elétricas e a distribuição dos pontos nos gráficos se apresenta pouco dispersa indicando uma média correlação entre as variáveis.



**Figura 24.** Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de silte com a resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).

Observa-se, na Figura 25, que os coeficientes de determinação de ambos os gráficos não explicam com segurança as variações do teor de argila em função das medidas elétricas e a distribuição dos pontos nos gráficos se apresenta pouco dispersa indicando uma média correlação entre as variáveis.



**Figura 25.** Gráficos de dispersão e linha de tendência entre o teor de argila com resistência elétrica (a) e com a capacitância elétrica (b).

Analisando a Figura 25, nota-se que quanto maior o índice de argila menor o índice de resistência elétrica do solo, ou seja, maior a condutividade elétrica, obtendo-se um resultado semelhante ao estudo realizado por Johnson et al. (2001), no Estado do Colorado, EUA, que também obtiveram significativa correlação entre os valores de argila e a condutividade elétrica medida por meio de um equipamento VERIS.

Os solos com teores mais elevados de argila conduzem mais eletricidade do que aqueles com textura mais arenosa. Os resultados podem ser constatados na Figura 25, onde o aumento do índice de argila corresponde à redução do índice de resistência elétrica. Da mesma forma, o aumento dos teores de areia corresponde a maiores valores de resistência elétrica, como se pode verificar na Figura 23.

### 6.3.5 Análise de correlação entre os valores amostrados em campo e os valores estimados

Utilizando os modelos matemáticos gerados pelas análises de regressão, foram calculados os valores estimados dos atributos do solo pelas medidas elétricas e comparados com os seus respectivos valores reais levantados no campo, para somente os maiores resultados de correlação entre as variáveis observadas nas Tabelas 6 e 7.

A Tabela 9 apresenta os coeficientes de correlação e determinação entre o valor real do atributo do solo e o seu valor estimado por resistência elétrica do solo referente aos melhores resultados da Tabela 6.

**Tabela 9.** Resultados dos coeficientes de correlação ( $r$ ) e determinação ( $r^2$ ) entre valor real e valor estimado pela análise de regressão com linha de tendência sem transformação dos valores utilizando os valores de resistência elétrica do solo.

	pH	Ca	Mg	SB	CTC	Areia	Silte	Argila
$r$	0,62	0,71	0,70	0,72	0,59	0,69	0,61	0,67
$R^2$	0,38	0,50	0,48	0,52	0,35	0,48	0,37	0,45

A Tabela 10 apresenta os coeficientes de correlação e determinação entre o valor real do atributo do solo e o seu valor estimado por capacitância elétrica do solo referente aos melhores resultados da Tabela 7.

**Tabela 10.** Resultados dos coeficientes de correlação ( $r$ ) e determinação ( $r^2$ ) entre valor real e valor estimado pela análise de regressão com linha de tendência sem transformação dos valores utilizando os valores de capacitância elétrica do solo.

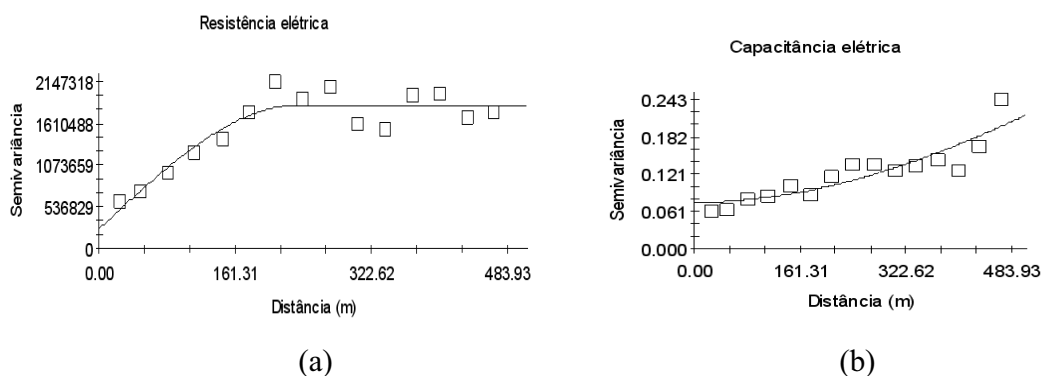
	pH	Ca	Mg	SB	CTC	Areia	Silte	Argila
$r$	0,85	0,95	0,95	0,95	0,94	0,70	0,75	0,65
$R^2$	0,73	0,9	0,9	0,9	0,88	0,48	0,56	0,43

Analisando as Tabelas 9 e 10, observa-se que os melhores índices de correlação se encontram na tabela 10, onde as variáveis foram estimadas pela capacitância

elétrica. De acordo com Vanni (1998), basicamente todo e qualquer coeficiente de correlação superior a 80% (0,80) revela que a relação é representativa dos pontos levantados. Sendo assim, destaca-se que nos resultados da Tabela 10, as correlações entre a capacitância elétrica e os atributos do solo pH, Ca, Mg, SB e CTC resultaram correlações acima de 80%, revelando relações representativas entre os pontos reais e os estimados.

#### 6.4 Análise geoestatística dos dados

A Figura 26 apresenta os variogramas isotrópicos experimentais e os teóricos dos dados de resistência e capacitância elétrica, bem como os seus respectivos parâmetros que indicam a qualidade do ajuste do modelo de variograma teórico ao experimental.

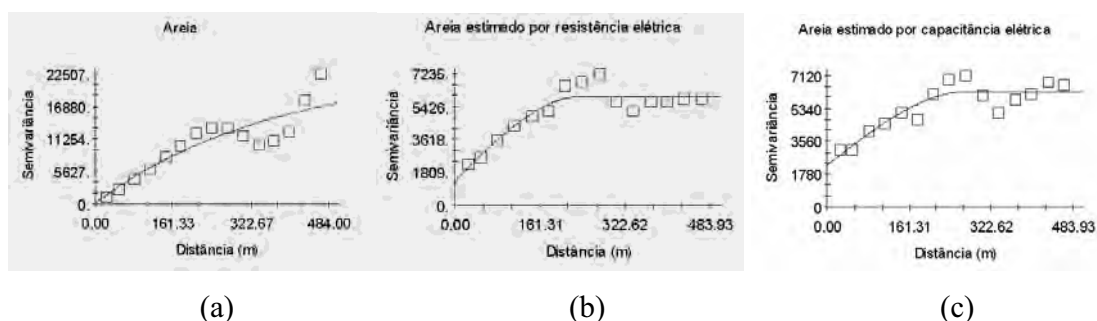


**Figura 26.** Variogramas isotrópicos dos atributos do solo: resistência elétrica (a) e capacitância elétrica (b).

Pode-se visualizar na Figura 26 os variogramas isotrópicos das amostras em campo dos índices de resistência e capacitância elétrica. Os gráficos indicam a existência de dependência espacial para ambos os atributos do solo, sendo que a resistência elétrica apresenta um alcance de 236,9 m e a capacitância elétrica não apresenta o seu alcance definido, pois a curva do gráfico continua subindo e não mostra tendência de estabilizar no patamar.

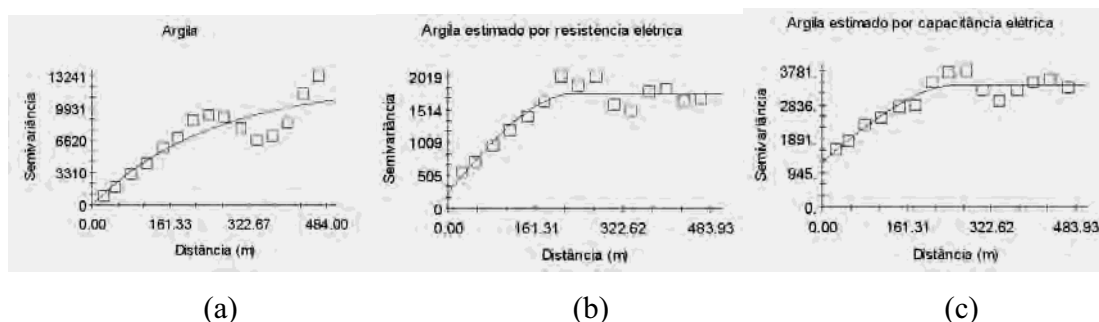
Nas Figuras de 27 a 41 se apresentam os variogramas isotrópicos experimentais e os teóricos dos dados dos atributos do solo amostrados em campo e os valores estimados pelas medidas elétricas, bem como os seus respectivos parâmetros que indicam a qualidade do ajuste do modelo de variograma teórico ao experimental.

A Figura 27 apresenta os gráficos dos variogramas isotrópicos dos teores de areia da amostragem em campo e dos valores estimados pelas medidas elétricas que indicam a existência de dependência espacial para todos os casos, mas pode-se observar que não existe semelhança entre os gráficos.



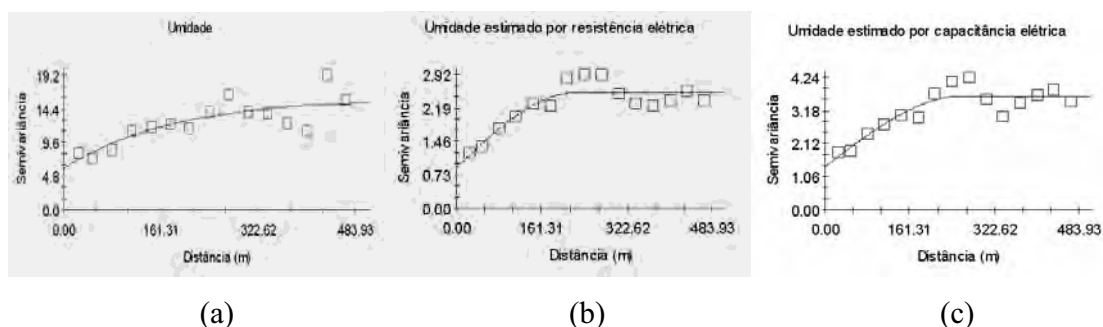
**Figura 27.** Variogramas isotrópicos dos teores de areia: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c).

Na Figura 28 podem-se visualizar os gráficos dos variogramas isotrópicos dos teores de argila da amostragem no campo e dos valores estimados pelas medidas elétricas, que indicam a existência de dependência espacial para todos os casos, mas pode-se observar que não existe semelhança entre os gráficos.



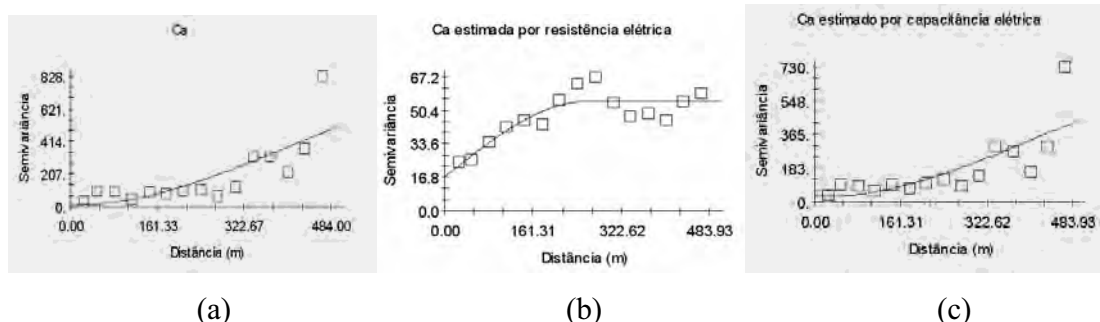
**Figura 28.** Variogramas isotrópicos dos teores de argila: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c).

A Figura 29 mostra os gráficos dos variogramas isotrópicos dos teores de água da amostragem em campo e dos valores estimados pelas medidas elétricas que indicam a existência de dependência espacial para todos os casos, mas pode-se observar que não existe semelhança entre os gráficos.



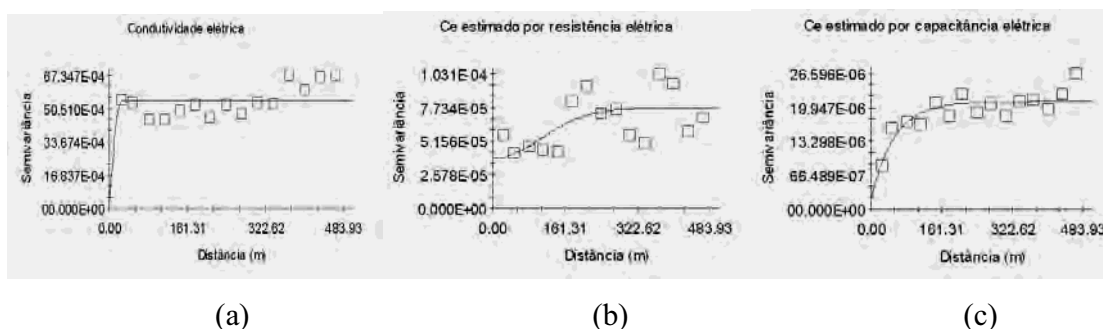
**Figura 29.** Variogramas isotrópicos dos teores de umidade: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c).

Pode-se visualizar na Figura 30 os variogramas isotrópicos dos teores de cálcio da amostragem de campo e dos valores estimados pelas medidas elétricas. Os gráficos indicam a existência de dependência espacial para todos os casos, mas pode-se observar que não existe semelhança entre os gráficos do valor real e estimado por resistência elétrica, mas existe uma semelhança muito boa entre os gráficos do valor real e o estimado por capacitância elétrica. As Figuras 30 (a) e (c) não apresentam os seus alcances definidos, pois as curvas dos gráficos continuam subindo e não mostram tendência de estabilizar no patamar.



**Figura 30.** Variogramas isotrópicos dos teores de cálcio: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c).

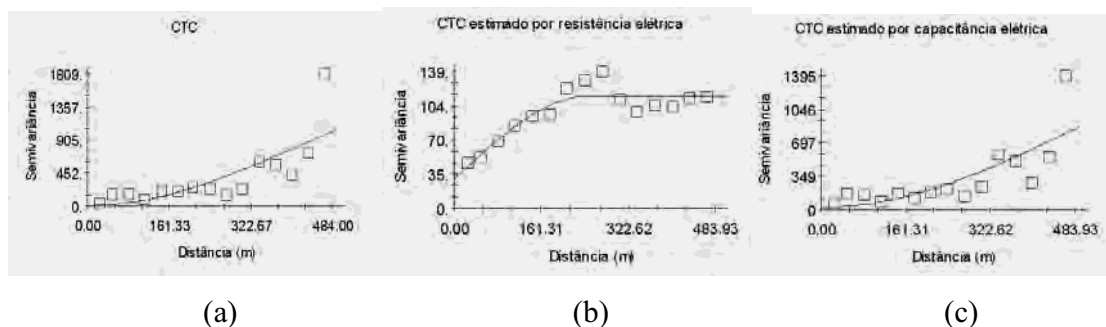
Na Figura 31 visualizam-se os gráficos dos variogramas isotrópicos dos níveis da condutividade elétrica da amostragem de campo e dos valores estimados pelas medidas elétricas, que indicam a existência de dependência espacial para os gráficos (b) e (c), mas apresenta um efeito pepita para o gráfico (a) indicando a inexistência de dependência espacial e pode-se observar que não existe semelhança entre os gráficos.



**Figura 31.** Variogramas isotrópicos dos índices de condutividade elétrica: valor real (a), valores estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c)

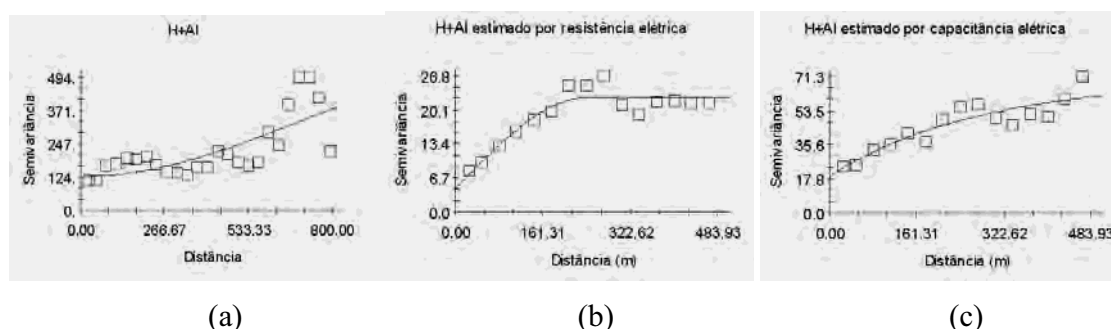
A Figura 32 apresenta os variogramas isotrópicos dos níveis de CTC da amostragem de campo e dos valores estimados pelas medidas elétricas. Os gráficos indicam a existência de dependência espacial para todos os casos, mas pode-se observar que não existe semelhança entre os gráficos do valor real e estimado por resistência elétrica, mas existe uma semelhança muito boa entre os gráficos do valor real e o estimado por capacitância elétrica. As

Figuras 32 (a) e (c) não apresentam os seus alcances definidos, pois as curvas dos gráficos continuam subindo e não mostram tendência de estabilizar no patamar.



**Figura 32.** Variogramas isotrópicos dos índices de CTC: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c).

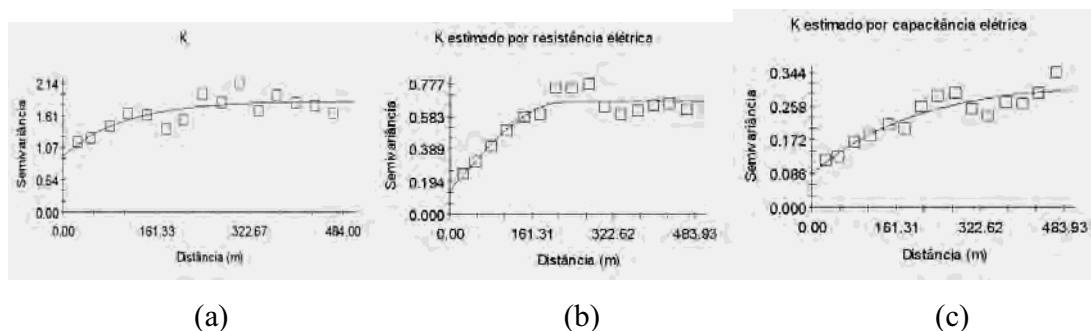
Apresentam-se na Figura 33 os gráficos dos variogramas isotrópicos dos teores de H+Al da amostragem de campo e dos valores estimados pelas medidas elétricas que indicam a existência de dependência espacial para todos os casos, mas pode-se observar que não existe semelhança entre os gráficos. A Figura 33 (a) não apresenta o seu alcance definido, pois a curva do gráfico continua subindo e não mostra tendência de estabilizar no patamar.



**Figura 33.** Variogramas isotrópicos dos teores de H+Al: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c).

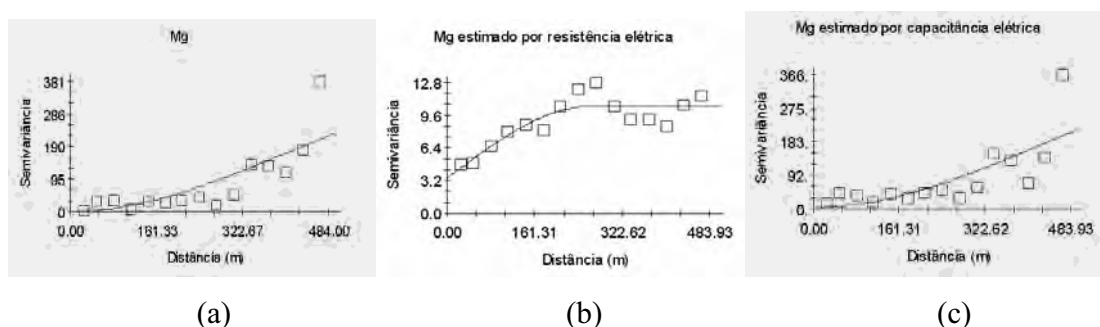
Na Figura 34 visualizam-se os gráficos dos variogramas isotrópicos dos teores de potássio da amostragem de campo e dos valores estimados pelas medidas

elétricas que indicam a existência de dependência espacial para todos os casos, mas pode-se observar que não existe semelhança entre os gráficos.



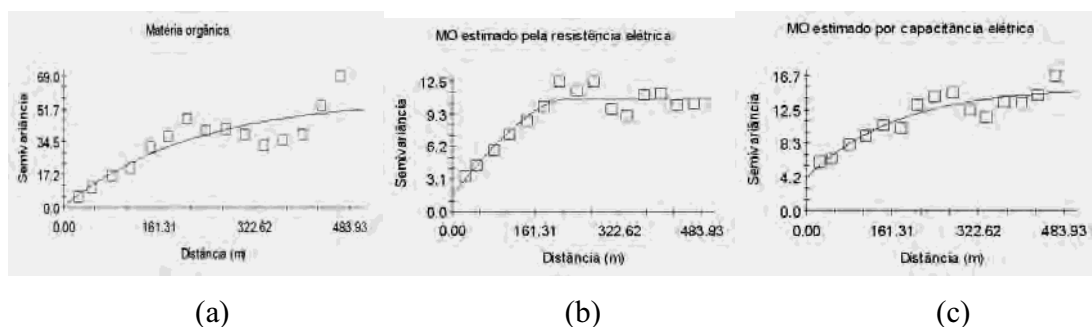
**Figura 34.** Variogramas isotrópicos dos teores de potássio: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c)

A Figura 35 mostra os variogramas isotrópicos dos teores de magnésio da amostragem de campo e dos valores estimados pelas medidas elétricas. Os gráficos indicam a existência de dependência espacial para todos os casos, mas pode-se observar que não existe semelhança entre os gráficos do valor real e estimado por resistência elétrica, mas existe uma semelhança muito boa entre os gráficos do valor real e o estimado por capacitância elétrica. As Figuras 35 (a) e (c) não apresentam os seus alcances definidos, pois as curvas dos gráficos continuam subindo e não mostram tendência de estabilizar no patamar.



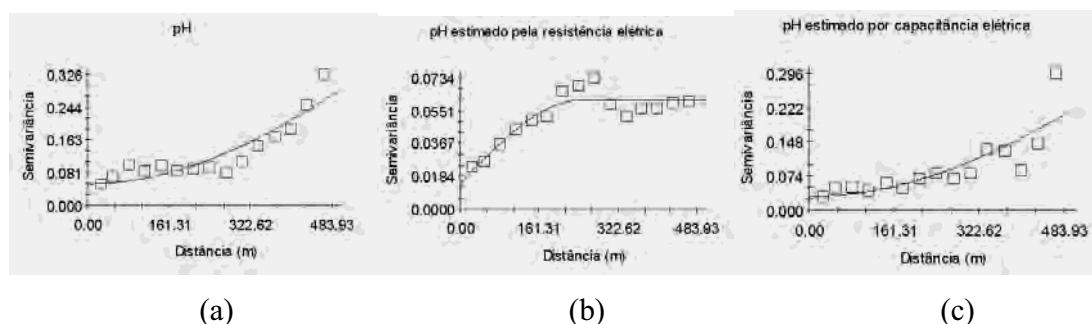
**Figura 35.** Variogramas isotrópicos dos teores de magnésio: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c).

Observam-se na Figura 36 os gráficos dos variogramas isotrópicos dos teores de matéria orgânica da amostragem de campo e dos valores estimados pelas medidas elétricas que indicam a existência de dependência espacial para todos os casos, mas pode-se observar que não existe semelhança entre os gráficos.



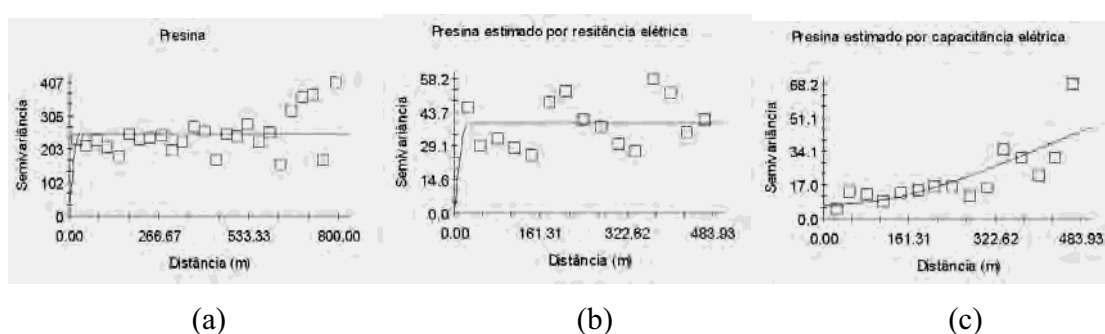
**Figura 36.** Variogramas isotrópicos dos teores de matéria orgânica: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c).

Na Figura 37 visualizam-se os variogramas isotrópicos dos níveis de pH da amostragem de campo e dos valores estimados pelas medidas elétricas. Os gráficos indicam a existência de dependência espacial para todos os casos, mas pode-se observar que não existe semelhança entre os gráficos do valor real e estimado por resistência elétrica, mas existe uma semelhança muito boa entre os gráficos do valor real e o estimado por capacitância elétrica. As Figuras 37 (a) e (c) não apresentam os seus alcances definidos, pois as curvas dos gráficos continuam subindo e não mostram tendência de estabilizar no patamar.



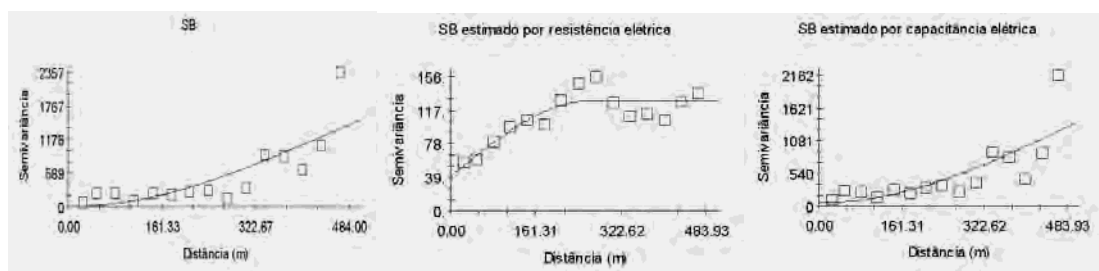
**Figura 37.** Variogramas isotrópicos dos índices de pH: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c).

Pode-se visualizar na Figura 38 os gráficos dos variogramas isotrópicos dos teores de Presina da amostragem de campo e dos valores estimados pelas medidas elétricas indicam a existência de dependência espacial para o gráfico (c), mas apresentam o efeito pepita para os gráficos (a) e (b) indicando a inexistência de dependência espacial e pode-se observar que não existe semelhança entre os gráficos. A Figura 38 (c) não apresenta o seu alcance definido, pois a curva do gráfico continua subindo e não mostra tendência de estabilizar no patamar.



**Figura 38.** Variogramas isotrópicos dos teores de Presina: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c).

Na Figura 39 visualizam-se os variogramas isotrópicos dos níveis de SB da amostragem de campo e dos valores estimados pelas medidas elétricas. Os gráficos indicam a existência de dependência espacial para todos os casos, mas pode-se observar que não existe semelhança entre os gráficos do valor real e estimado por resistência elétrica, mas existe uma semelhança muito boa entre os gráficos do valor real e o estimado por capacitância elétrica. As Figuras 39 (a) e (c) não apresentam os seus alcances definidos, pois as curvas dos gráficos continuam subindo e não mostram tendência de estabilizar no patamar.



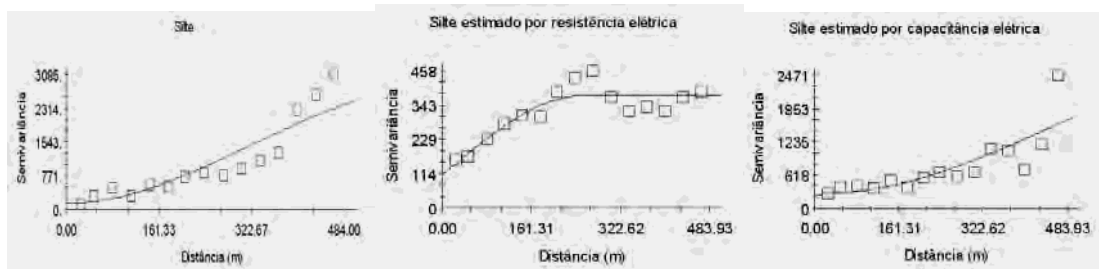
(a)

(b)

(c)

**Figura 39.** Variogramas isotrópicos dos índices de SB: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c).

Apresentam-se na Figura 40 os variogramas isotrópicos dos teores de silte da amostragem de campo e dos valores estimados pelas medidas elétricas. Os gráficos indicam a existência de dependência espacial para todos os casos, mas pode-se observar que não existe semelhança entre os gráficos do valor real e estimado por resistência elétrica, mas existe uma semelhança regular entre os gráficos do valor real e o estimado por capacitância elétrica. As Figuras 40 (a) e (c) não apresentam os seus alcances definidos, pois as curvas dos gráficos continuam subindo e não mostram tendência de estabilizar no patamar.



(a)

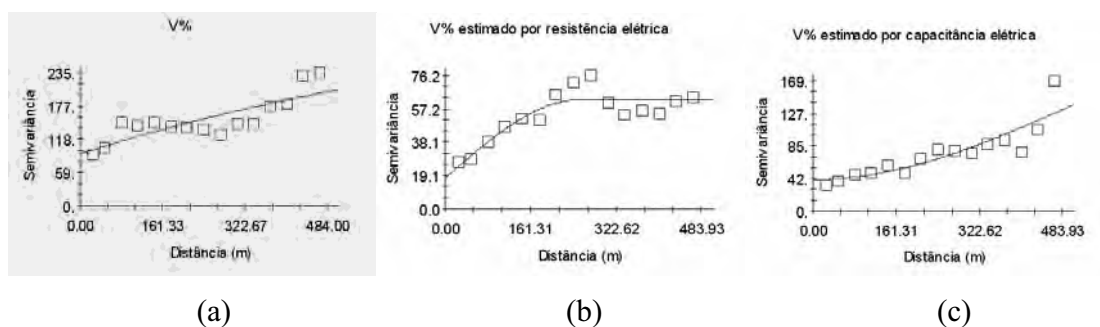
(b)

(c)

**Figura 40.** Variogramas isotrópicos dos teores de silte: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c).

A Figura 41 mostra os gráficos dos variogramas isotrópicos dos níveis de V% da amostragem de campo e dos valores estimados pelas medidas elétricas que indicam a existência de dependência espacial para todos os casos, mas pode-se observar que não existe

semelhança entre os gráficos. A Figura 41 (c) não apresenta o seu alcance definido, pois a curva do gráfico continua subindo e não mostra tendência de estabilizar no patamar.



**Figura 41.** Variogramas isotrópicos dos índices de V%: valor real (a), valor estimado por resistência elétrica (b) e valor estimado por capacitância elétrica (c).

Analisando os variogramas, se verificou que o valor da função variograma  $\gamma(h)$  aumenta quando a distância ( $h$ ) aumenta, implicando que quanto maior o valor da função variograma maiores diferenças serão encontradas entre as observações, concordando com o estudo de Vicente (2004), onde as observações mais próximas foram mais semelhantes que observações mais distantes.

A Tabela 11 apresenta os resultados das análises dos variogramas isotrópicos experimentais e teóricos para todas as variáveis em estudo amostradas em campo, indicando os valores do efeito pepita ( $C_0$ ), do patamar ( $C_0+C_1$ ), do alcance ( $a$ ), o índice de dependência espacial e a classe de dependência espacial.

**Tabela 11.** Resultados das análises variográficas dos dados amostrados em campo.

Variável	Efeito Pepita (Co)	Patamar (Co+C1)	Alcance (a) (m)	[C1/(Co+C1)] x100	Classe de Dependência Espacial
Resistência elétrica	252000	1849000	236,9	86	Forte
Capacitância elétrica	0,076	0,714	*	89	Forte
Teor de umidade	5,84	15,91	179	63	Moderada
Condutividade elétrica	0,00029	0,00543	24,9	95	Forte
pH	0,054	1,127	*	95	Forte
Matéria orgânica	0,4	57,44	218	99	Forte
Presina	24,8	248,6	31	90	Forte
H+Al	126	662,9	*	81	Forte
K – Potássio	0,925	1,851	105,5	50	Moderada
Ca – Cálcio	12	934,9	*	99	Forte
Mg – Magnésio	1	412,9	*	99	Forte
SB	1	3112	*	99	Forte
CTC	8	2126	*	99	Forte
V%	92,7	380,4	1010,9	76	Forte
Areia	70	23570	371,4	99	Forte
Silte	150	3410	*	96	Forte
Argila	10	12420	247,5	100	Forte

\* Não apresenta o valor do alcance definido

Visando definir limites distintos de dependência espacial para os atributos do solo, Zimback (2001) adaptou os limites propostos por Cambardella et al. (1994) e propôs as seguintes classificações: i-)  $(C1/C).100 \leq 25\%$ , indicando variável espacial fraca dependente, ou seja, alta variabilidade espacial da variável; nesse caso, não há restrição quanto à aplicação da estatística clássica para qualquer distância ii-)  $25\% < (C1/C).100 \leq 75\%$ , indicando variável moderadamente dependente e, iii-)  $(C1/C).100 > 75\%$ , indicando variável espacial fortemente dependente, ou seja, pequena variabilidade espacial da variável.

Na análise de todos os atributos do solo da Tabela 11, verifica-se que praticamente todas variáveis apresentam forte dependência espacial, com exceção dos teores de água e potássio, que apresentam moderada dependência espacial.

Também se observa que a condutividade elétrica e Presina apresentam alcance respectivamente de 24,9 e 31 metros, sendo distâncias menores que a maior distância entre as amostras de campo, que variaram aproximadamente de 20 a 800 metros. Assim, pode-se afirmar que os valores de condutividade elétrica e Presina são espacialmente dependentes até 24,9 e 31 metros respectivamente. Isto indica que valores de condutividade elétrica e Presina separados por uma distância superior a estes valores são independentes entre si, propiciando desta forma a aplicação da estatística clássica. As demais variáveis apresentam alcances acima de 100 metros.

A Tabela 12 apresenta os resultados das análises dos variogramas isotrópicos experimentais e teóricos para todas as variáveis em estudo amostradas em campo, indicando o modelo de ajuste do variograma teórico ao experimental, o valor do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e a soma dos quadrados dos resíduos (SQR).

**Tabela 12.** Resultados dos parâmetros geoestatísticos das amostragens em campo.

Variável	Modelo	r <sup>2</sup>	SQR
Resistência elétrica	Esférico	0,87	4,37E+11
Capacitância elétrica	Gaussiano	0,79	6,11E-03
Teor de umidade	Exponencial	0,66	48,6
Condutividade elétrica	Esférico	0	8,3E-06
pH	Gaussiano	0,85	0,0121
Matéria orgânica	Exponencial	0,74	973
Presina	Esférico	0	90794
H+Al	Gaussiano	0,57	127380
K – Potássio	Exponencial	0,64	0,368
Ca – Cálcio	Gaussiano	0,65	208343
Mg – Magnésio	Gaussiano	0,69	44281
SB	Gaussiano	0,68	1,6E+06
CTC	Gaussiano	0,62	1,05E+06
V%	Exponencial	0,66	7503
Areia	Exponencial	0,80	8,7E+07
Silte	Gaussiano	0,85	1,7E+06
Argila	Exponencial	0,81	3,13E+07

Analisando a Tabela 12 verifica-se que, de acordo com Vanni (1998), os coeficientes de determinação apresentaram valores sem segurança para o ajustamento dos variogramas das variáveis condutividade elétrica, Presina e H+Al. Porém, apresentam regular segurança de ajustamento para as variáveis umidade, M.O., K, Ca, Mg, SB, CTC e V%. Para as variáveis capacitância, areia e argila apresentam boa segurança de ajustamento, e ótima segurança de ajustamento para resistência elétrica, pH e silte.

No ajuste dos modelos matemáticos dos variogramas teórico ao experimental resultou em 47% dos ajustamentos com modelo gaussiano, 35% exponencial e 18% esférico, critério utilizado pelo programa GS+ que selecionou os modelos que apresentaram os menores valores de SQR.

As estimativas das variáveis para os locais não amostrados variam de acordo com a dependência espacial do atributo estudado, que é influenciado pela densidade de pontos e, conseqüentemente, pela distância entre as amostras. Portanto, a densidade de pontos utilizada no presente estudo pode não ter sido suficiente para representar a dependência espacial dos atributos condutividade elétrica, Presina, H+AL e potássio. Mas a distância entre as amostras empregada neste estudo mostrou-se eficiente para detectar a dependência espacial para os demais atributos do solo analisados no presente trabalho.

A Tabela 13 apresenta os resultados das análises dos variogramas isotrópicos experimentais e teóricos das variáveis estimadas através dos valores de resistência elétrica amostrada em campo por meio das expressões resultantes nas Figuras 11 a 25. Indica os valores do efeito pepita ( $C_0$ ), do patamar ( $C_0+C_1$ ), do alcance ( $a$ ), o índice de dependência espacial e a classe de dependência espacial.

**Tabela 13.** Resultados das análises variográficas dos dados estimados pelos valores de resistência elétrica do solo.

Variável	Efeito Pepita (Co)	Patamar (Co+C1)	Alcance (a) (m)	$[C1/(Co+C1)] \times 100$	Classe de Dependência Espacial
Teor de umidade	0,887	2,54	227,2	65	Moderada
Condutividade elétrica	3,8E-05	7,7E-05	261,02	51	Moderada
pH	0,0143	0,0608	245,5	77	Forte
Matéria orgânica	1,57	10,88	234,9	86	Forte
Presina	0,9	38,91	24,9	98	Forte
H+Al	4,61	22,45	242,1	80	Forte
K – Potássio	0,144	0,671	227,5	79	Forte
Ca – Cálcio	17,1	54,89	259,4	69	Moderada
Mg – Magnésio	3,4	10,46	263,4	68	Moderada
SB	40	127,5	259,8	69	Moderada
CTC	30,1	114,5	249,3	74	Moderada
V%	17,6	62,4	252,6	72	Moderada
Areia	1350	6018	244,2	78	Forte
Silte	108,6	374,4	254	71	Moderada
Argila	254	1761	234,7	86	Forte

Foram analisados todos os valores dos atributos do solo da Tabela 13 e se verificou que as variáveis pH, M.O., Pr, H+Al, K, areia e argila apresentam forte dependência espacial e as outras variáveis apresentam moderada dependência espacial. Também se observou que Presina apresentou o menor alcance entre as variáveis com 24,9 metros, sendo que as distâncias entre as amostras em campo variaram de 20 a 70 metros. As demais variáveis apresentam alcances acima de 227 a 263 metros.

Observa-se que os valores de Presina são espacialmente dependentes até 24,9 metros, isto indica que valores de Presina separados por uma distância superior a este valor são independentes entre si propiciando desta forma a aplicação da estatística clássica.

A Tabela 14 apresenta os resultados das análises dos variogramas isotrópicos experimentais e teóricos das variáveis estimadas através dos valores de resistência

elétrica amostrada em campo por meio das expressões resultantes das Figuras 11 a 25. Indica o modelo de ajuste do variograma teórico ao experimental, o valor do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e a soma dos quadrados dos resíduos (SQR).

**Tabela 14.** Resultados dos parâmetros geoestatísticos das variáveis estimadas pelos valores de resistência elétrica do solo.

Variável	Modelo	$r^2$	SQR
Teor de umidade	Esférico	0,82	0,648
Condutividade elétrica	Gaussiano	0,32	4E-09
pH	Esférico	0,86	4,15E-04
Matéria orgânica	Esférico	0,89	11,7
Presina	Esférico	0	1571
H+Al	Esférico	0,88	51,5
K – Potássio	Esférico	0,89	0,0377
Ca – Cálcio	Esférico	0,77	497
Mg – Magnésio	Esférico	0,75	19,5
SB	Esférico	0,77	2690
CTC	Esférico	0,84	1600
V%	Esférico	0,81	534
Areia	Esférico	0,87	38,54E+05
Silte	Esférico	0,81	19756
Argila	Esférico	0,86	307539

Analisando a Tabela 14 verifica-se que, de acordo com Vanni (1998), os coeficientes de determinação apresentam valores sem segurança para o ajustamento dos variogramas das variáveis para condutividade elétrica e Presina. Mas apresentam boa segurança de ajustamento para as variáveis umidade, Ca, Mg, SB, CTC, V% e teor de silte. E, para as variáveis pH, M.O., H+Al, K, teor de areia e argila, apresentam ótima segurança de ajustamento.

Do ajuste dos modelos matemáticos dos variogramas teórico ao experimental resultou que somente a condutividade elétrica apresentou ajustamento com modelo gaussiano e as demais variáveis apresentaram ajustamento com modelo esférico.

A Tabela 15 apresenta os resultados das análises dos variogramas isotrópicos experimentais e teóricos das variáveis estimadas através dos valores da capacitância elétrica amostradas em campo por meio das expressões resultantes das Figuras 11 a 25. Indica os valores do efeito pepita ( $C_0$ ), do patamar ( $C_0+C_1$ ), do alcance ( $a$ ), o índice de dependência espacial e a classe de dependência espacial.

**Tabela 15.** Resultados das análises variográficas dos dados estimados pelos valores de capacitância elétrica do solo.

Variável	Efeito Pepita $C_0$	Patamar ( $C_0+C_1$ )	Alcance ( $a$ ) (m)	$[C_1/(C_0+C_1)] \times 100$	Classe de Dependência Espacial
Teor de umidade	1,376	3,658	264,9	62	Moderada
Condutividade elétrica	2E-06	21E-06	159,6	90	Forte
pH	0,03	0,889	*	97	Forte
Matéria orgânica	4,01	15,31	506,4	74	Moderada
Presina	6,9	84,8	*	92	Forte
H+Al	19,3	69,34	828	72	Moderada
K – Potássio	0,0845	0,319	590	74	Moderada
Ca – Cálcio	26	862,9	*	97	Forte
Mg – Magnésio	5	420,9	*	99	Forte
SB	60	3230	*	98	Forte
CTC	28	2166	*	99	Forte
V%	41,3	283,5	*	85	Forte
Areia	2270	6270	280	64	Moderada
Silte	260	3630	*	93	Forte
Argila	1256	3399	264	63	Moderada

\* Não apresenta o valor do alcance definido

Ao analisar todos os atributos do solo da tabela 15, observa-se que as variáveis condutividade elétrica, pH, Pr, Ca, Mg, SB, CTC, V% e teor de silte apresentam forte dependência espacial e as variáveis umidade, M.O., H+Al, K, teor de areia e argila apresentam moderada dependência espacial. Também se observa que a condutividade elétrica apresenta o menor alcance entre as variáveis com a distância de 159,6 metros.

A Tabela 16 apresenta os resultados das análises dos variogramas isotrópicos experimentais e teóricos das variáveis estimadas através do valor da capacitância elétrica amostradas em campo por meio das expressões resultante das Figuras 11 a 25. Indica o modelo de ajuste do variograma teórico ao experimental, o valor do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e a soma dos quadrados dos resíduos (SQR).

**Tabela 16.** Resultados dos parâmetros geoestatísticos das variáveis estimadas pelos valores de capacitância elétrica do solo.

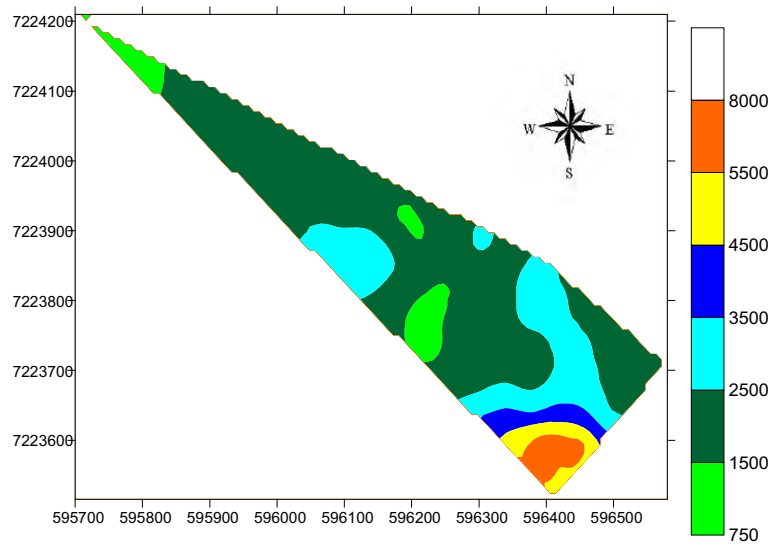
Variável	Modelo	$r^2$	SQR
Teor de umidade	Esférico	0,82	1,37
Condutividade elétrica	Exponencial	0,71	6,5E-11
pH	Gaussiano	0,71	0,0181
Matéria orgânica	Exponencial	0,86	19,1
Presina	Gaussiano	0,65	1207
H+Al	Exponencial	0,82	415
K – Potássio	Exponencial	0,85	8,42E-03
Ca – Cálcio	Gaussiano	0,62	164489
Mg – Magnésio	Gaussiano	0,60	45824
SB	Gaussiano	0,63	14,3E+05
CTC	Gaussiano	0,62	61,2E+04
V%	Gaussiano	0,78	3459
Areia	Esférico	0,83	3,94E+06
Silte	Gaussiano	0,69	13,26E+05
Argila	Esférico	0,88	7,27E+05

Analisando a Tabela 16 verifica-se que, de acordo com Vanni (1998), os coeficientes de determinação apresentam valores de regular segurança para o ajustamento dos variogramas das variáveis para condutividade elétrica, pH, Presina, Ca, Mg, SB, CTC e teor de silte. Mas apresentam boa segurança de ajustamento para as variáveis umidade, H+Al, V% e teor de areia. E, para as variáveis M.O., K e argila, apresentam ótima segurança de ajustamento.

Nos ajustes dos modelos matemáticos dos variogramas teórico ao experimental resultaram em 53% dos ajustamentos com modelo gaussiano, 27% exponencial e 20% esférico, critério utilizado pelo programa GS+, que selecionou os modelos que apresentaram os menores valores de SQR.

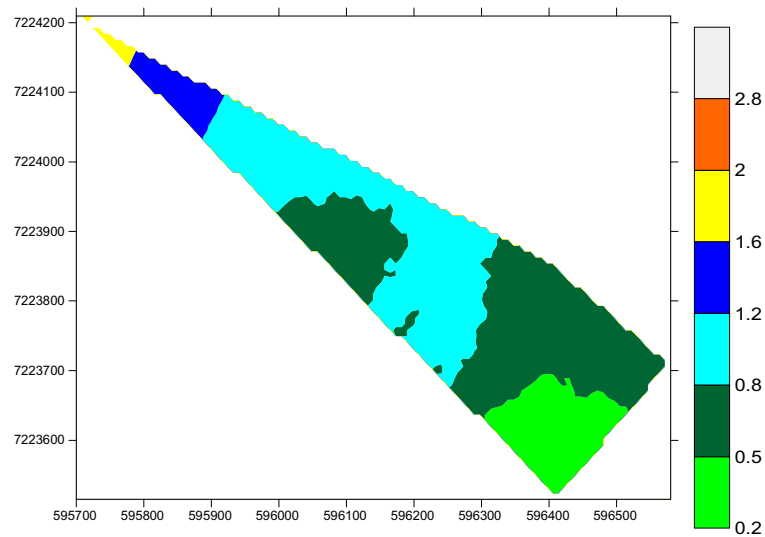
### **6.5 Mapas de superfície**

Para todos os atributos do solo amostrados em campo e os estimados pelas equações de regressão foram confeccionados mapas interpolados da área em estudo e para geração dos mapas da distribuição espacial das variáveis foi utilizado o programa GS+. No programa GS+ foi criado um arquivo com extensão GRD resultante da interpolação por krigagem, que gerou um mapa em duas dimensões com tamanho maior que a área em estudo, depois este arquivo foi importado pelo programa Surfer, para confeccionar o mapa no tamanho exato da área experimental, conforme pode ser visualizado nas Figuras de 42 a 57. A Figura 42 (a) mostra que na maior parte da área experimental a resistência elétrica apresenta níveis médios de 2000 ohms, sendo que os maiores níveis estão localizados na extremidade sul, atingindo valores até 8000 ohms, e reduzindo seus níveis até a extremidade norte, com o menor valor de 750 ohms. Pode-se observar na Figura 42 (b) que os maiores níveis de capacitância elétrica se encontram na extremidade norte da área, e os menores níveis no extremo sul, índices variando de 0,2 a 2,8 micro-farads. Mas, na maior parte da área experimental, a capacitância apresenta valores entre 0,5 a 1,2 micro-farads.



(a)

(Ohms)



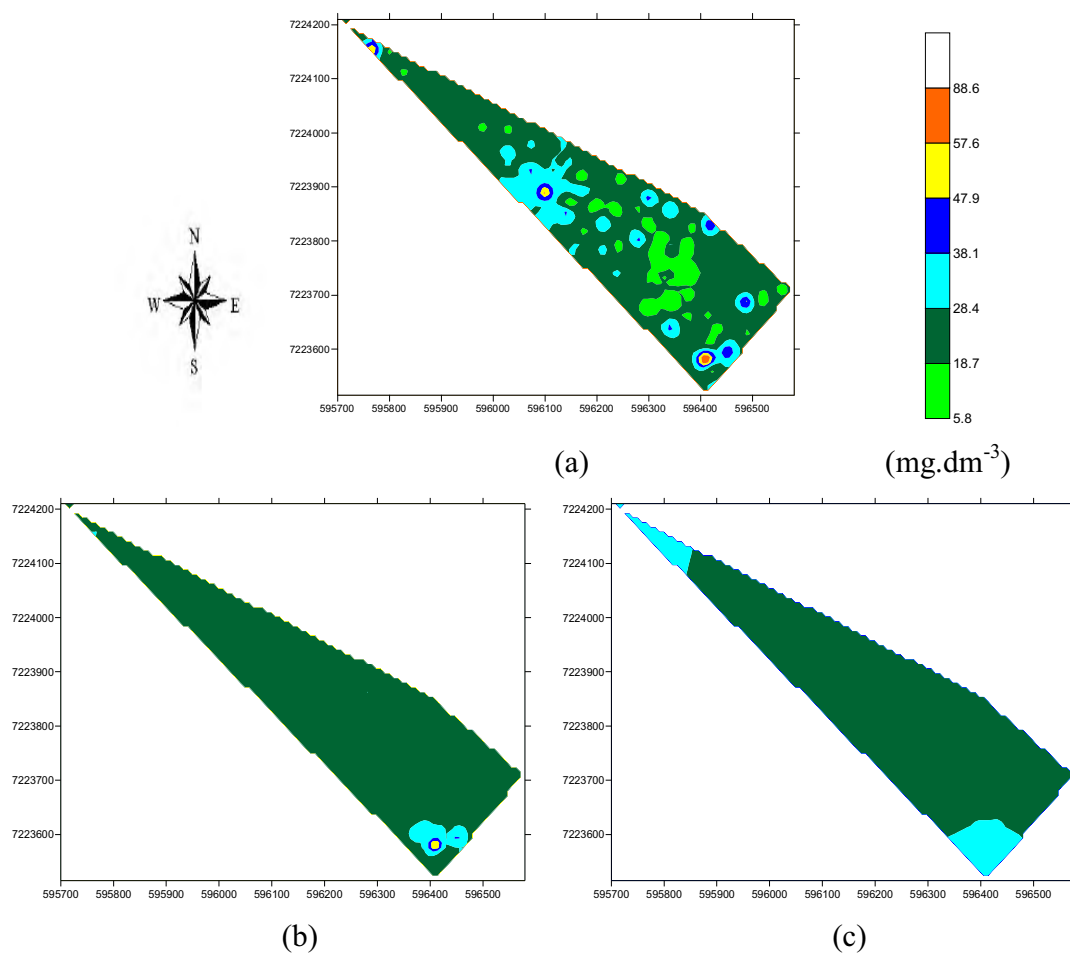
(b)

(Micro-farads)

Escala 1:11000

**Figura 42.** Mapas da variabilidade espacial dos níveis de resistência elétrica do solo (a) e de capacitância elétrica do solo (b).

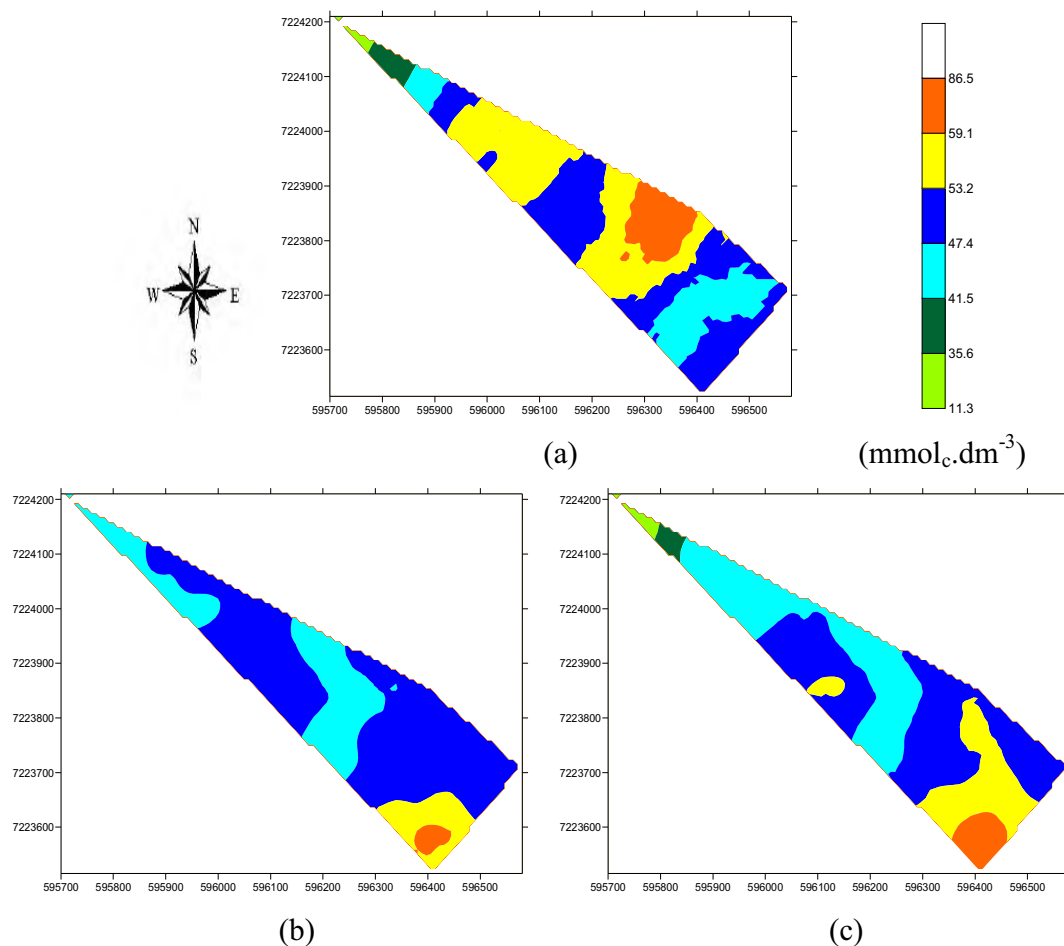
Na Figura 43, o mapa real do teor de Presina apresenta níveis baixos na maior parte da área experimental, apresentando uma krigagem ruim, como se pode visualizar na Figura 38 (a), o variograma apresentou o efeito pepita puro e quando isso ocorre, a krigagem não se mostra um bom método de interpolação. Comparando com os mapas estimados pela análise de regressão, mostra boa semelhança com o mapa de resistência elétrica e regular semelhança com o mapa de capacitância elétrica. Comparando com a Figura 42, mostra regular semelhança com mapa de resistência elétrica e fraca semelhança com mapa de capacitância elétrica.



Escala 1:14200

**Figura 43.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de Presina do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c).

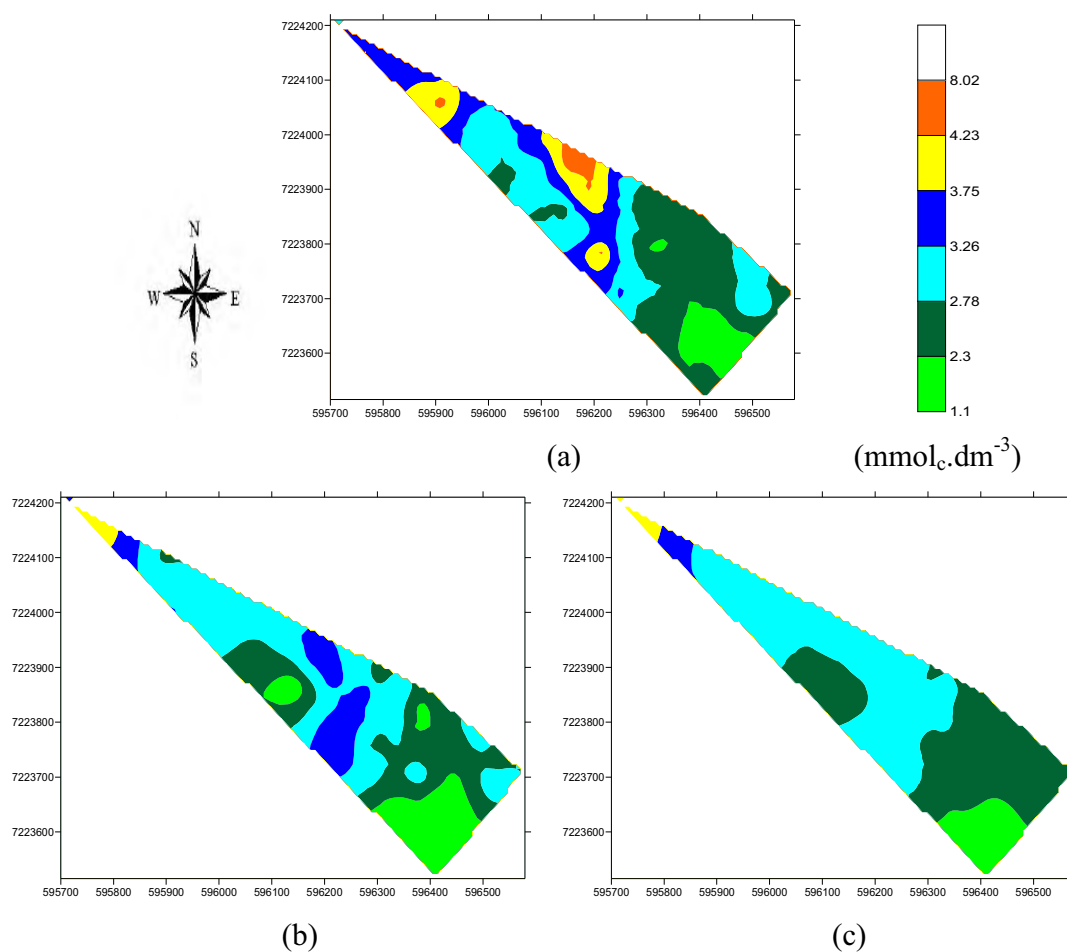
O mapa real de (H+AL) da Figura 44, mostra que os maiores valores se encontram no meio da área experimental, reduzindo seus valores para ambas as extremidades norte e sul do mapa. Comparando com os mapas estimados pela análise de regressão não apresenta semelhança com o mapa estimado por resistência elétrica e apresenta boa semelhança com mapa estimado por capacitância elétrica na extremidade norte. Também comparando com os mapas da Figura 42, apresentam fraca semelhança direta com a resistência elétrica e também fraca semelhança inversa com a capacitância elétrica, ambas as medidas na extremidade norte da área experimental.



Escala 1:14200

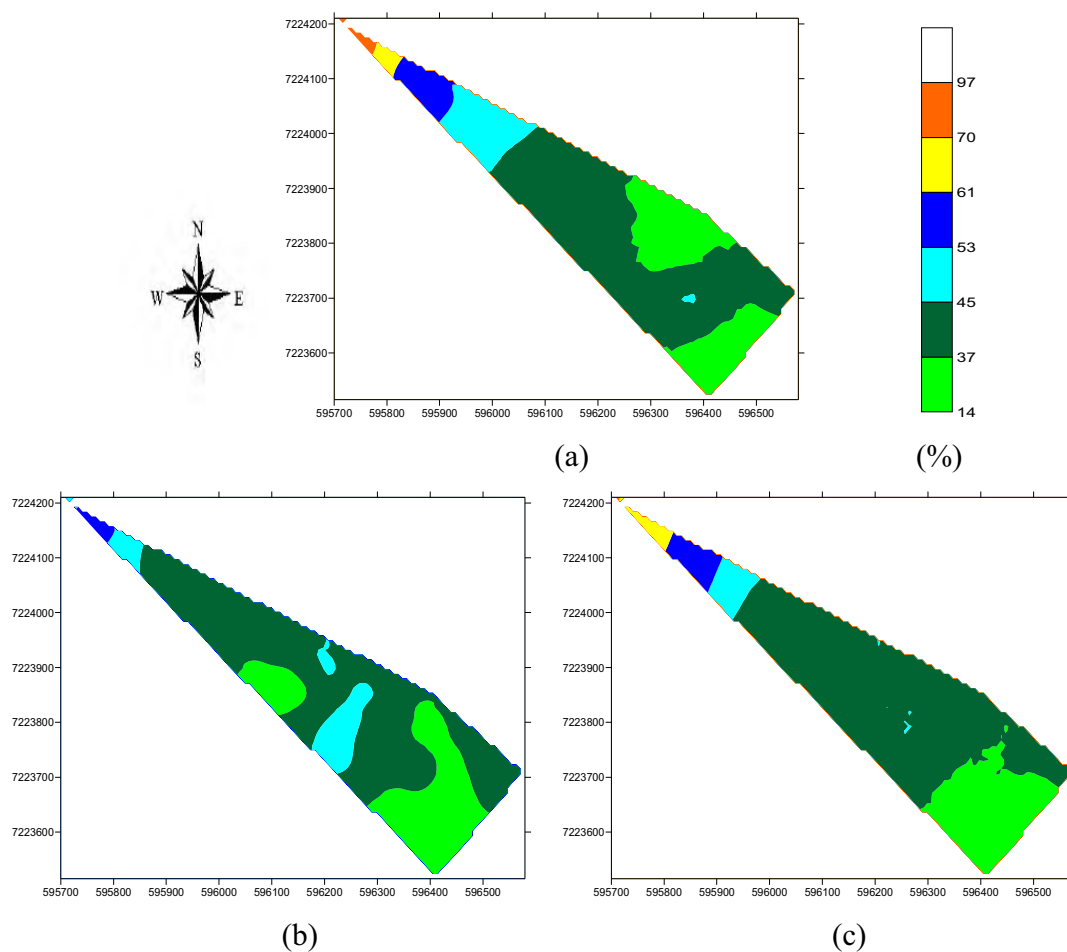
**Figura 44.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de acidez potencial do solo (H+Al) real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c).

A Figura 45 mostra os níveis reais de potássio menores na extremidade sul da área experimental, e comparando com os mapas estimados pela análise de regressão apresenta boa semelhança na extremidade sul da área com o mapa estimado por resistência elétrica e também o mapa estimado por capacitância elétrica apresenta boa semelhança com o mapa real. Comparando com os mapas da Figura 42, apresenta fraca semelhança direta com a capacitância elétrica e fraca semelhança inversa com resistência elétrica na extremidade sul da área.



**Figura 45.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de potássio do solo (K) real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c).

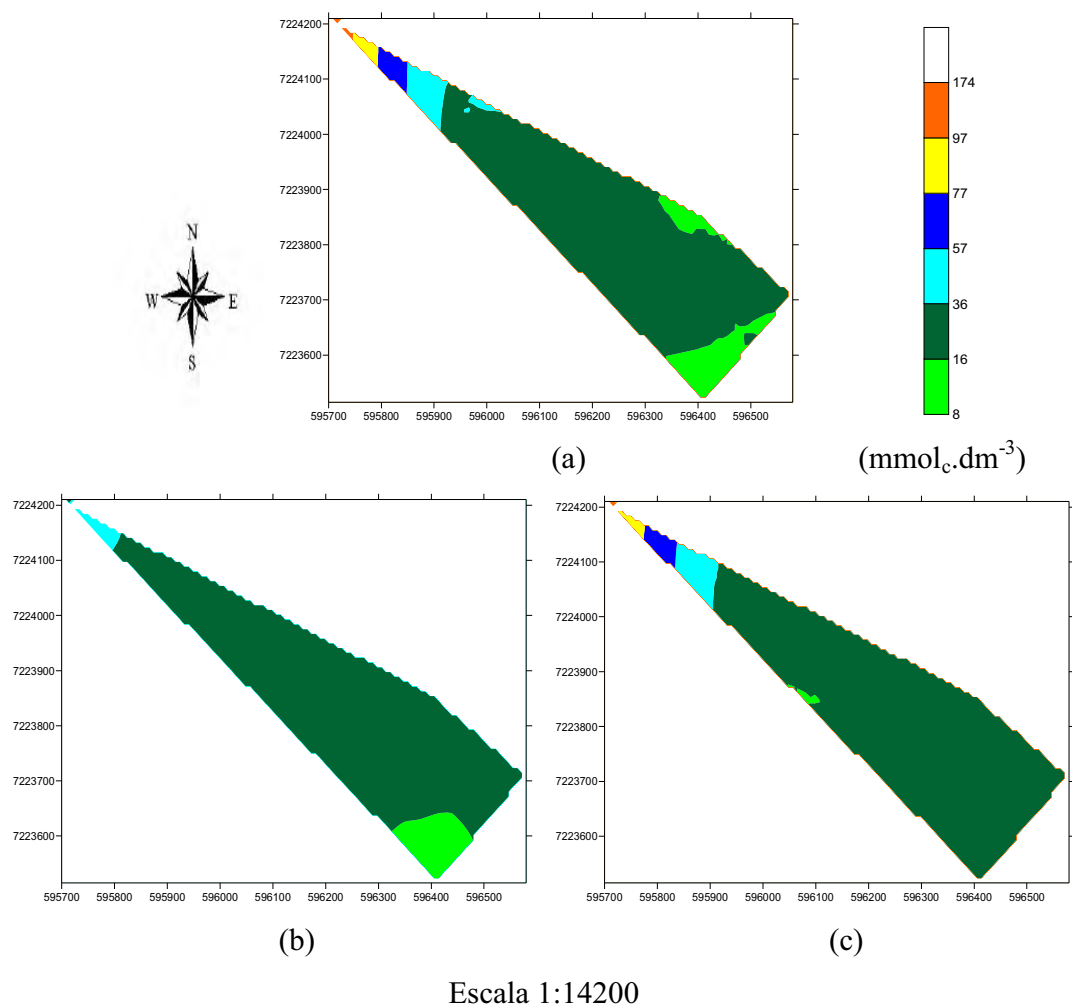
Na Figura 46, o mapa real dos teores de V% apresenta níveis aumentando da extremidade sul para a região norte da área, e comparando com os valores estimados pela equação de regressão apresenta regular semelhança com o mapa de resistência elétrica e apresenta boa semelhança com o mapa de capacitância elétrica. Comparando com os mapas da Figura 42, apresenta fraca semelhança invertida com o mapa de resistência elétrica e regular semelhança direta com o mapa de capacitância elétrica.



Escala 1:14200

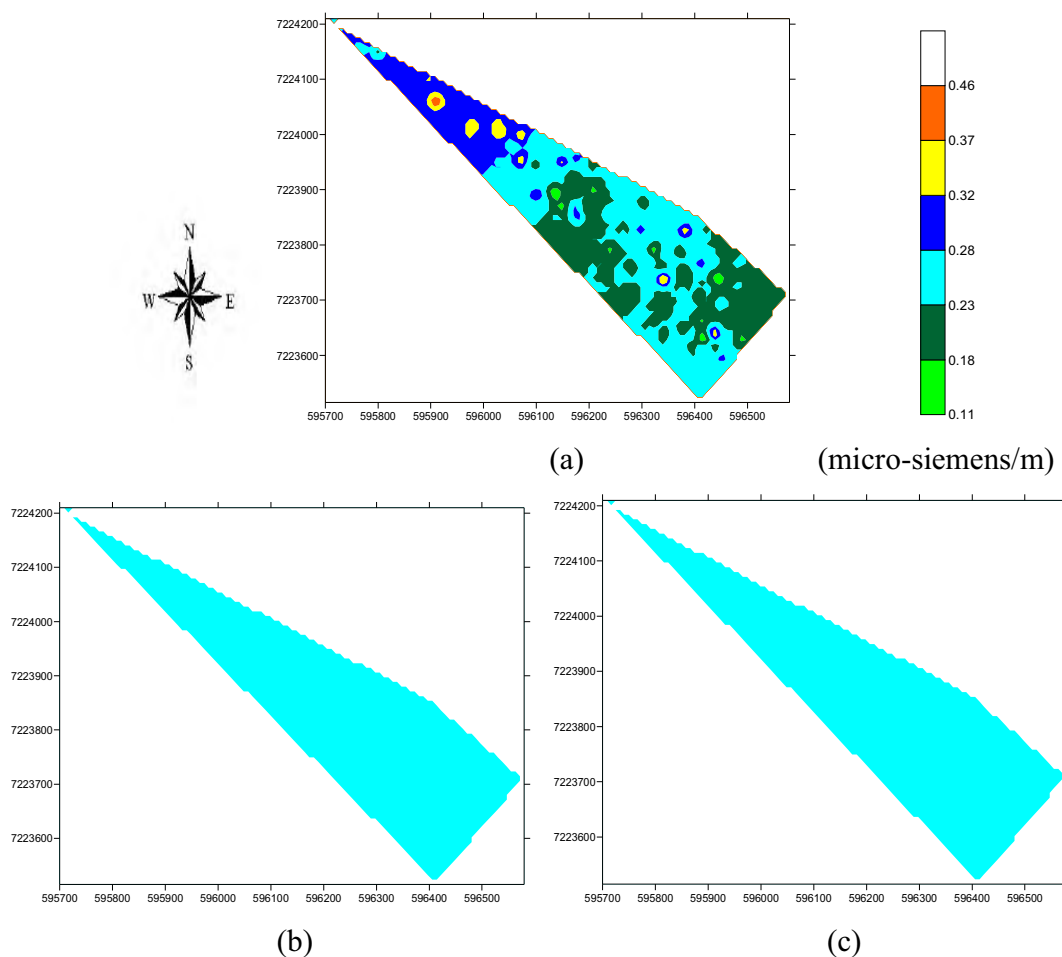
**Figura 46.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de V% do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c).

O mapa real da Figura 47 apresenta os níveis de cálcio aumentando do extremo sul para o norte da área experimental. Comparando com o mapa estimado por resistência elétrica mostra regular semelhança com o mapa real e o mapa estimado por capacitância mostra boa semelhança com o mapa real. Também, comparando com a Figura 42, mostra fraca semelhança invertida com o mapa da resistência elétrica e regular semelhança direta com o mapa de capacitância elétrica.



**Figura 47.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de cálcio do solo (Ca) real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c).

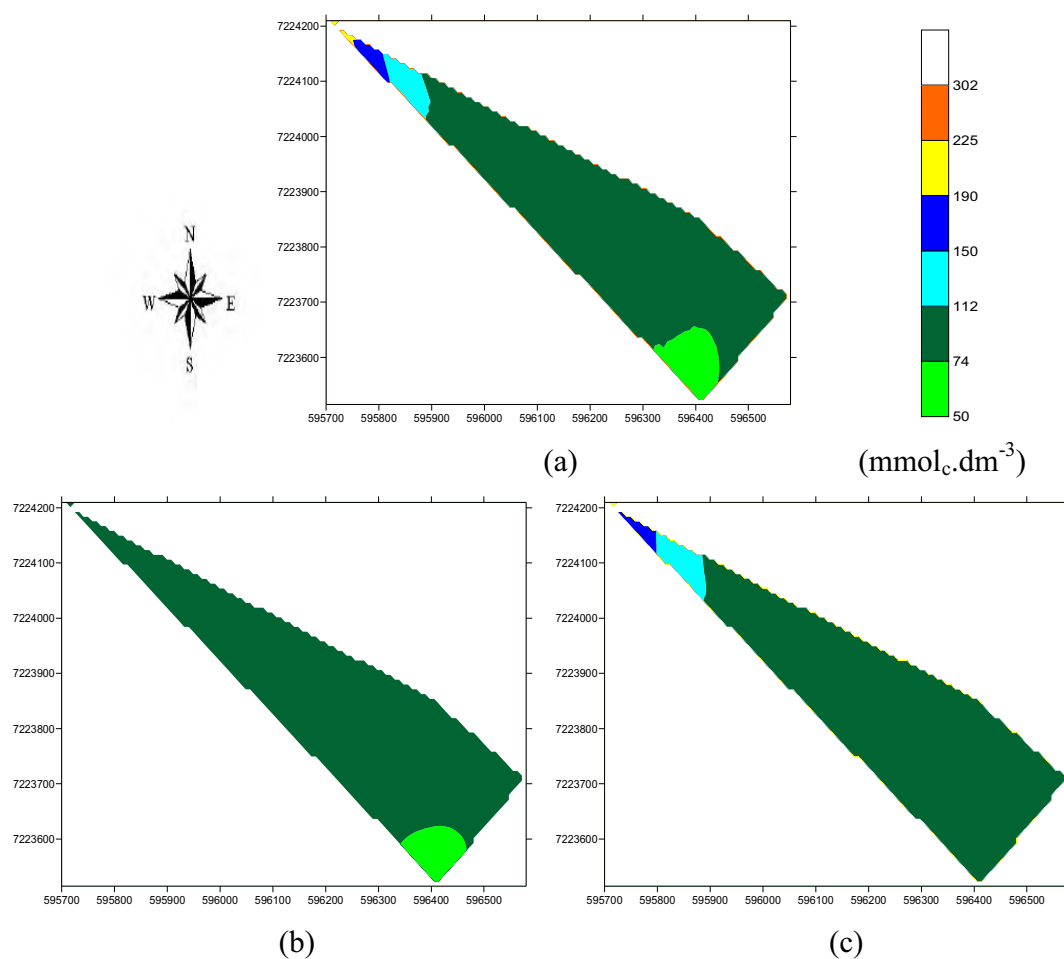
O mapa real da Figura 48 (a) apresenta níveis de condutividade elétrica aumentando da extremidade sul para o norte, apresentando uma krigagem ruim, como pode-se visualizar na Figura 31 (a), o variograma apresentou o efeito pepita puro e quando isso ocorre, a krigagem não se mostra um bom método de interpolação. Assim, resultando os mapas estimados por resistência e capacitância elétrica com fraca semelhança, gerando mapas iguais com somente uma faixa de valores variando de 0,23 a 0,26 unidades. Comparando com os mapas da Figura 42, apresenta fraca semelhança invertida com o mapa de resistência elétrica e com regular semelhança direta ao mapa da capacitância elétrica.



Escala 1:14200

**Figura 48.** Mapas da variabilidade espacial dos níveis de condutividade elétrica do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c).

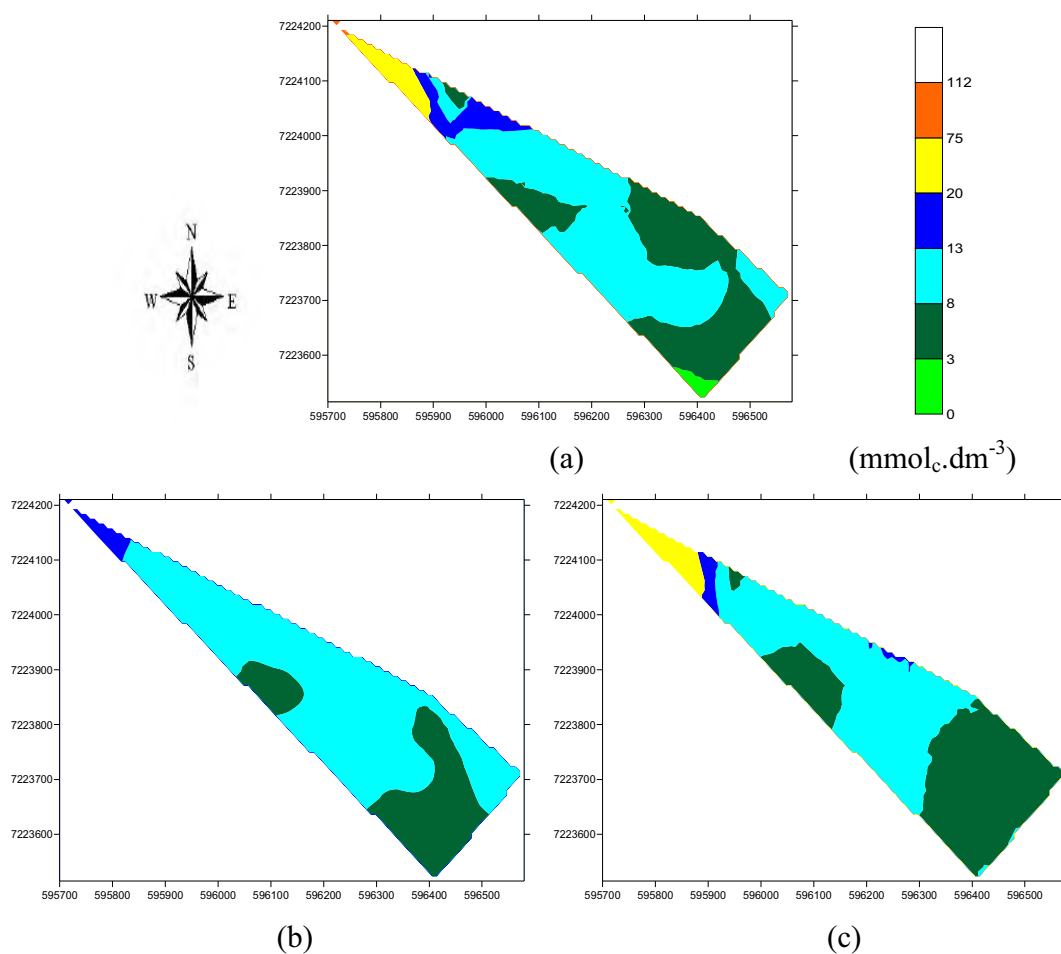
Na Figura 49, o mapa real dos níveis de CTC apresenta a maior parte de sua área com níveis baixos. Com relação aos mapas estimados, mostra uma regular semelhança com o mapa de resistência elétrica e boa semelhança com o mapa de capacitância elétrica. Comparando com os mapas da Figura 42, apresenta fraca semelhança invertida com o mapa de resistência elétrica e regular semelhança direta com o mapa de capacitância elétrica.



Escala 1:14200

**Figura 49.** Mapas da variabilidade espacial dos níveis de capacidade de troca de cátions do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c).

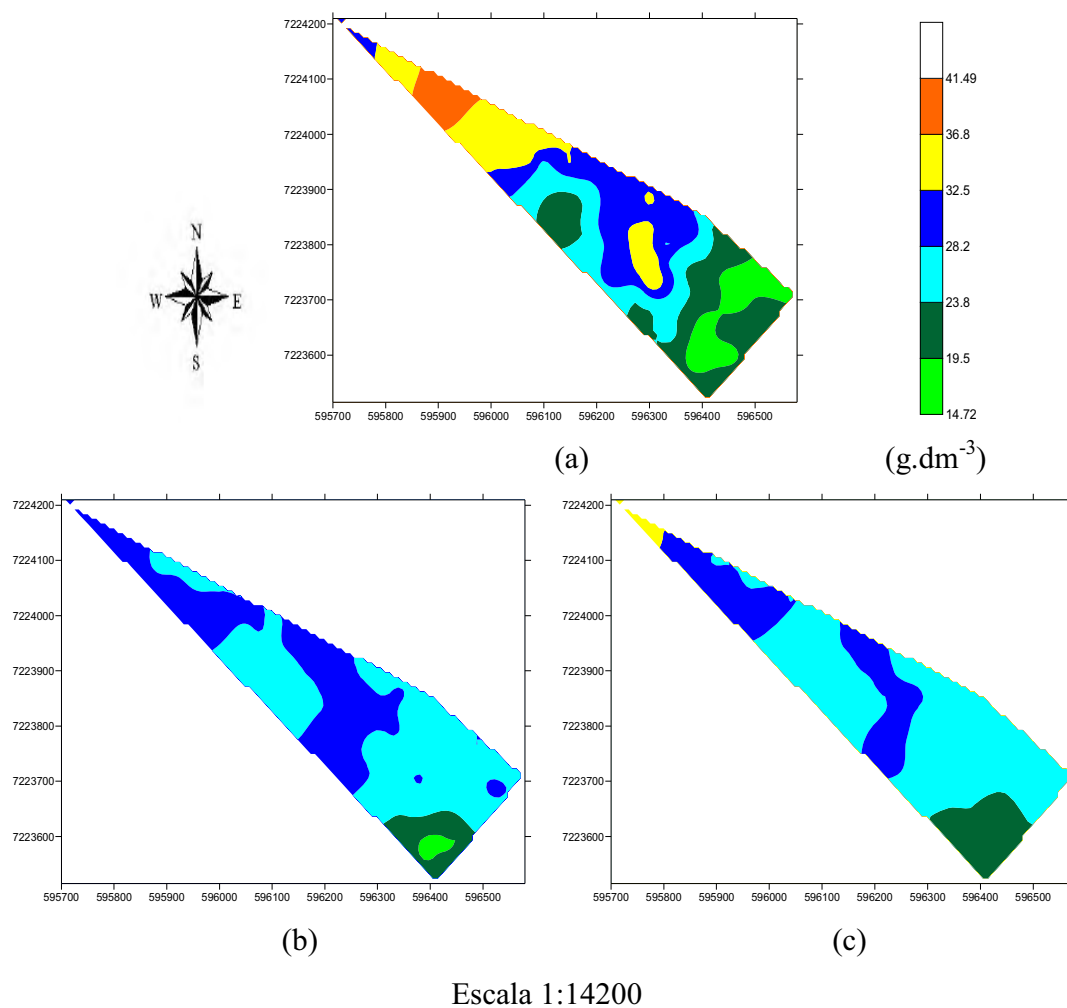
Na Figura 50, o mapa real dos teores de magnésio apresenta o aumento de seus níveis do extremo sul para o norte. Também apresenta regular semelhança em relação aos mapas estimados por resistência e capacitância elétrica. Comparando com os mapas da Figura 42, mostra uma regular semelhança invertida com o mapa de resistência elétrica e boa semelhança direta com o mapa de capacitância elétrica.



Escala 1:14200

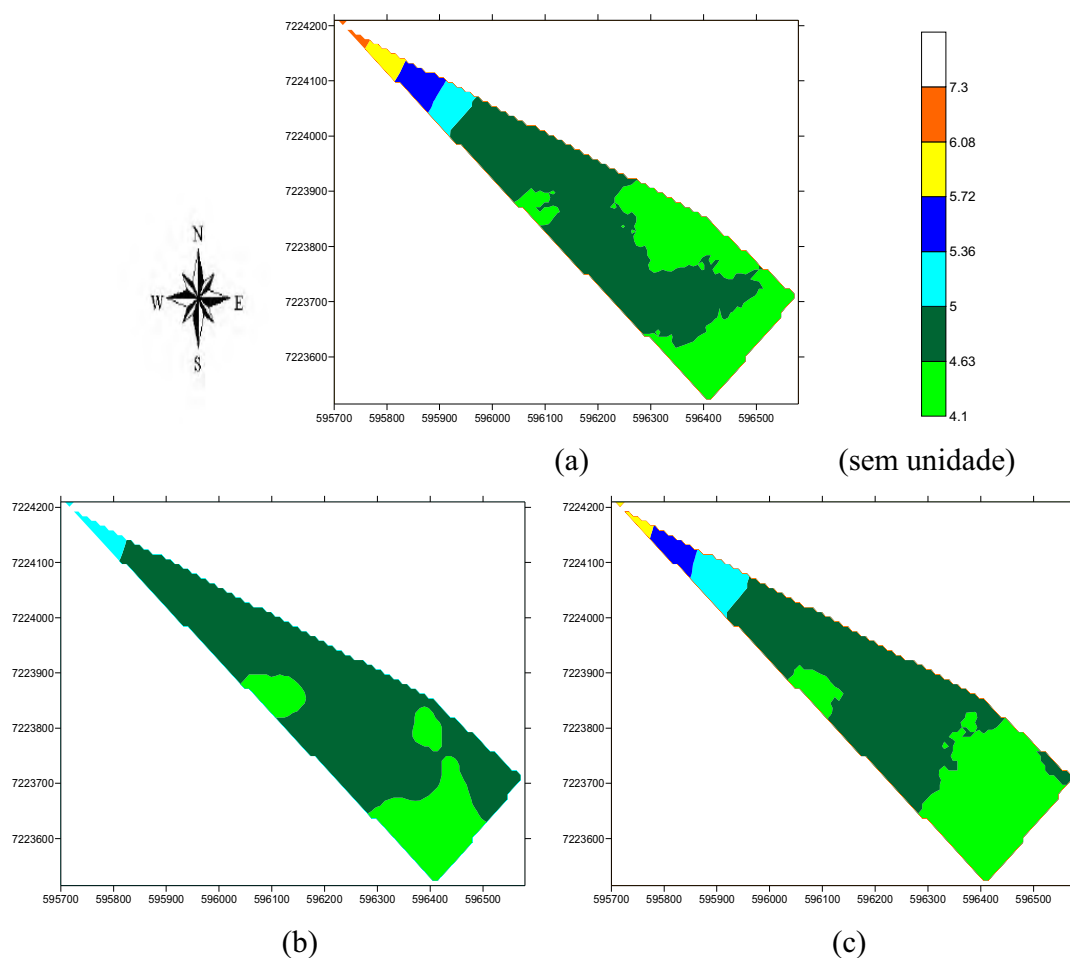
**Figura 50.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de magnésio (Mg) do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c).

O mapa com teores reais de M.O. da Figura 51 apresenta os níveis aumentando do extremo sul para o norte da área experimental. Em relação aos mapas estimados mostra fraca semelhança no centro e boa semelhança no extremo sul com o mapa de resistência elétrica e fraca semelhança no extremo norte, centro e sul do mapa de capacitância elétrica. Comparando com os mapas da Figura 42, mostra fraca semelhança direta com a capacitância elétrica e praticamente sem semelhança com o mapa de resistência elétrica.



**Figura 51.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de matéria orgânica (M.O) do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c).

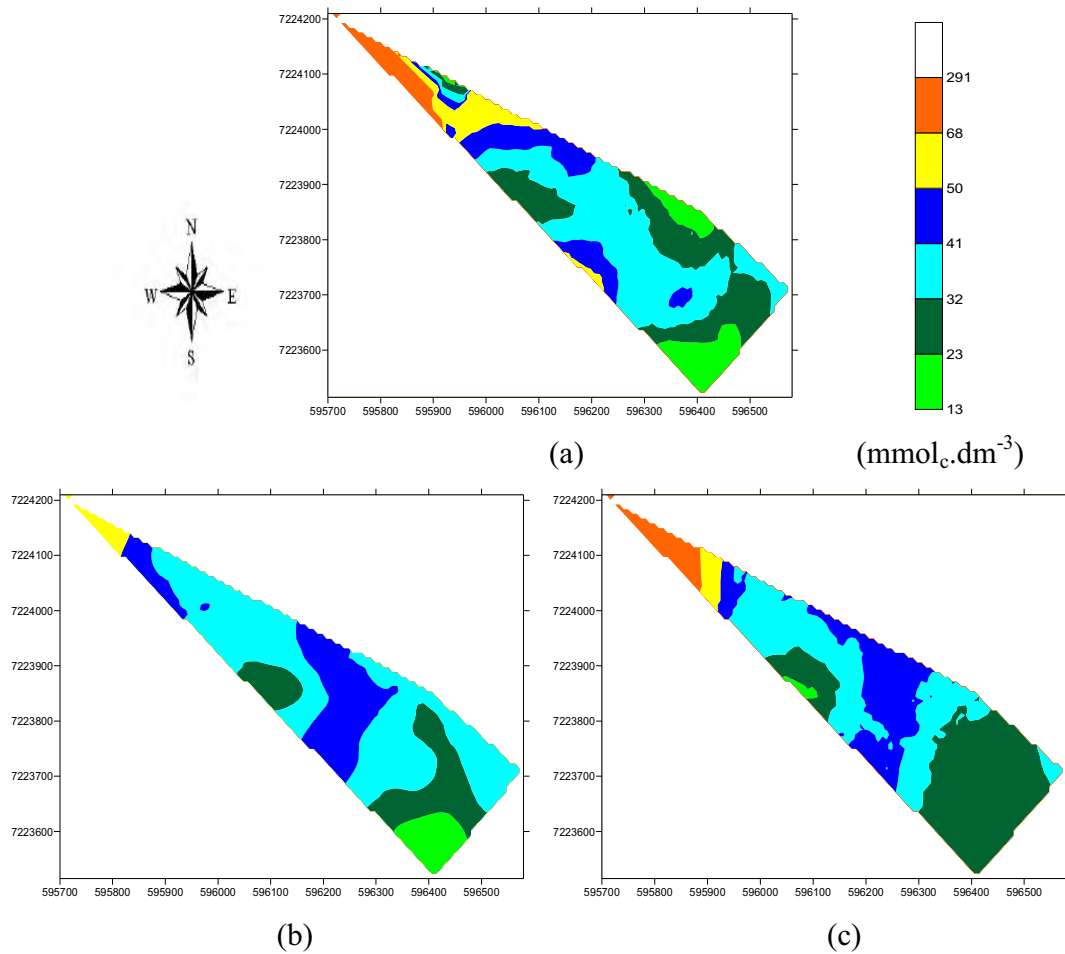
A Figura 52 mostra os níveis reais de pH aumentando da extremidade sul para região norte da área em estudo. Em relação aos mapas estimados por equações de regressão apresenta regular semelhança com o mapa de resistência elétrica e boa semelhança com o mapa da capacitância elétrica. Comparando com os mapas da Figura 42, apresenta regular semelhança invertida na extremidade norte e ao centro da área com o mapa de resistência elétrica e regular semelhança direta com capacitância elétrica na extremidade norte e na área central do mapa.



Escala 1:14200

**Figura 52.** Mapas da variabilidade espacial dos níveis de potencial de hidrogênio do solo (pH) real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c).

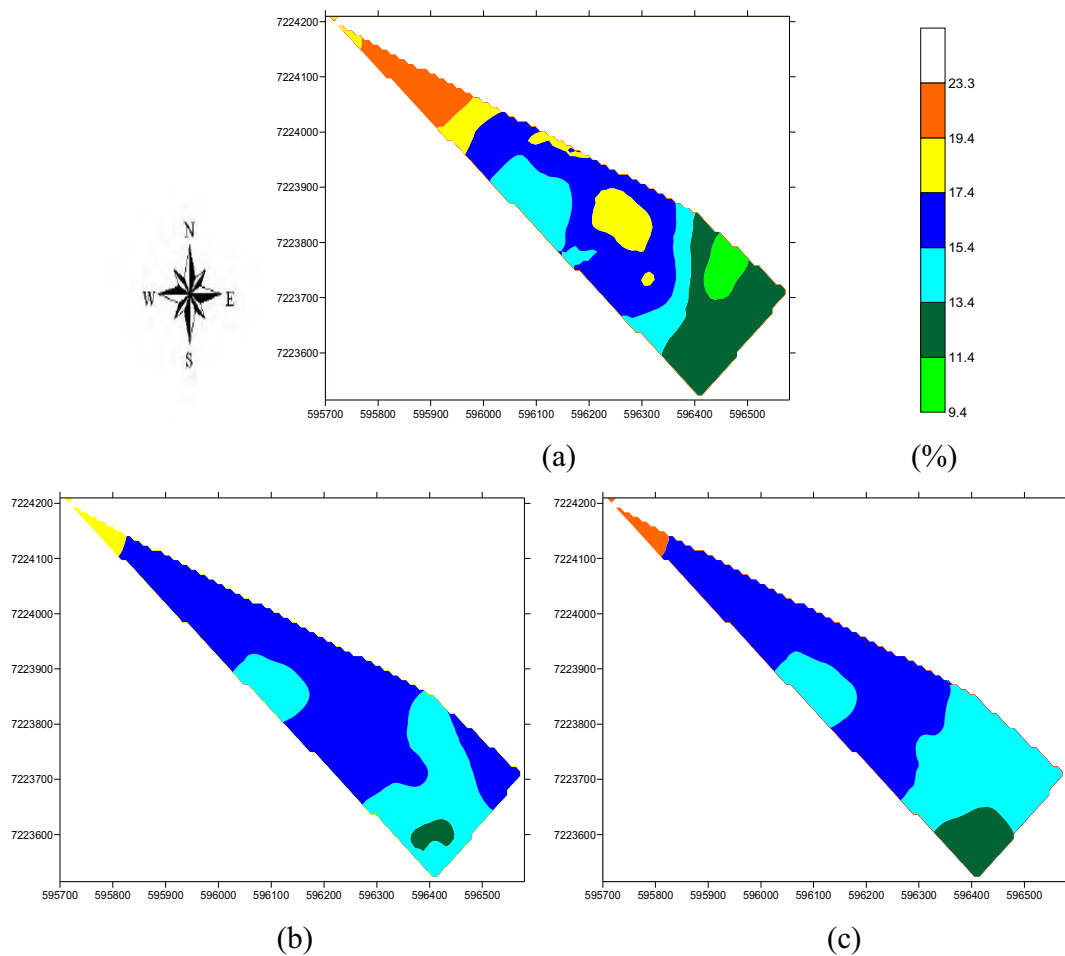
O mapa real da Figura 53 mostra níveis de SB aumentando do extremo sul para o norte, comparando com os mapas estimados apresenta regular semelhança com os mapas de resistência e capacitância elétrica. Comparando com os mapas da Figura 42, apresenta fraca semelhança direta nas extremidades norte e sul com o mapa de capacitância elétrica e fraca semelhança invertida nas extremidades norte e sul com o mapa de resistência elétrica.



Escala 1:14200

**Figura 53.** Mapas da variabilidade espacial dos níveis da soma de bases do solo (SB) real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c).

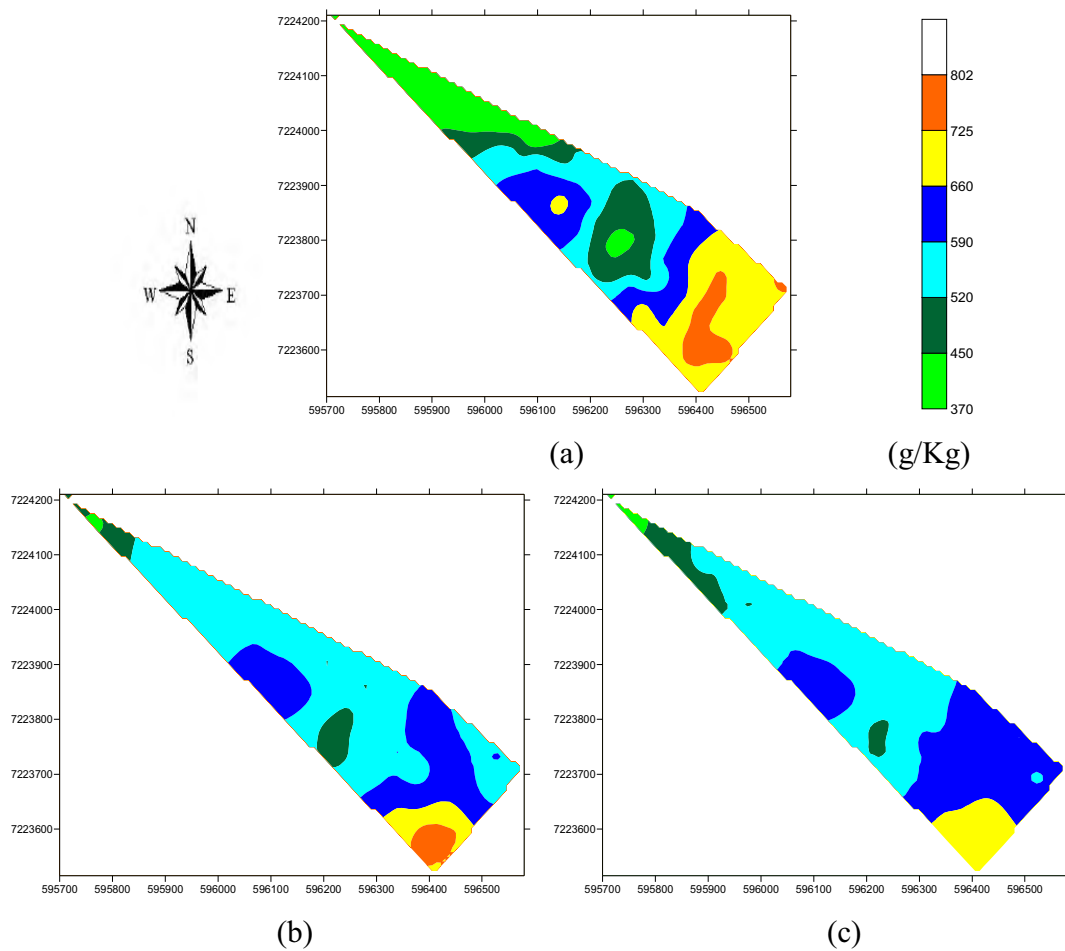
Na Figura 54, o mapa real dos teores de umidade mostra níveis aumentando da região sul para o norte da área experimental. Comparado aos mapas estimados por equações de regressão, apresenta fraca semelhança nas extremidades e semelhança regular no centro do mapa em relação ao mapa de resistência elétrica e regular semelhança em toda área com o mapa de capacitância elétrica. Comparando os mapas da Figura 42, apresenta fraca semelhança invertida com o mapa de resistência elétrica e fraca semelhança direta com o mapa de capacitância elétrica.



Escala 1:14200

**Figura 54.** Mapas da variabilidade espacial da porcentagem dos teores de umidade do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c).

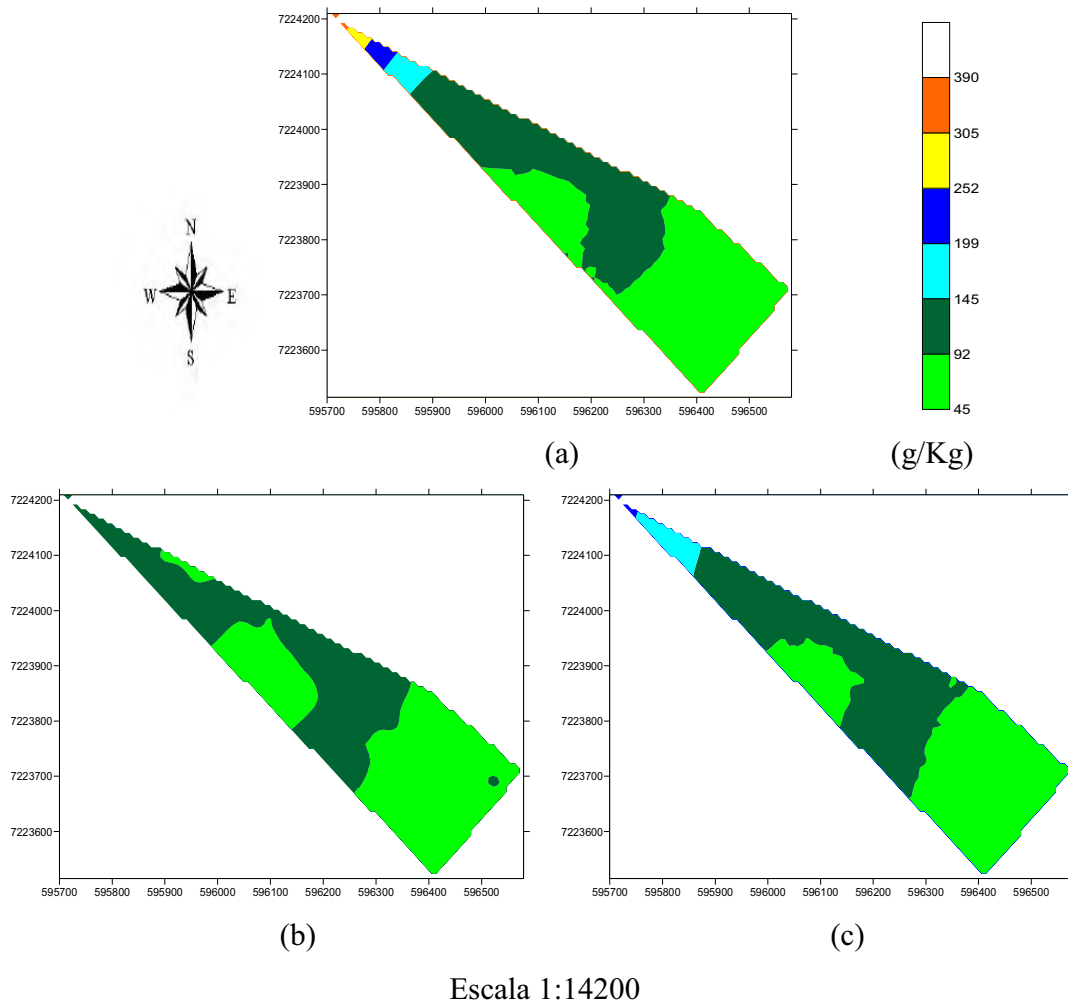
O mapa real da Figura 55 apresenta os menores níveis de areia na extremidade norte aumentando os valores até a extremidade sul. O mapa estimado por resistência elétrica apresenta fraca semelhança com o mapa real e o mapa estimado por capacitância elétrica apresenta também fraca semelhança com o mapa real. Comparando com os mapas da Figura 42, apresenta fraca semelhança invertida com o mapa de capacitância elétrica e boa semelhança direta com o mapa de resistência elétrica.



Escala 1:14200

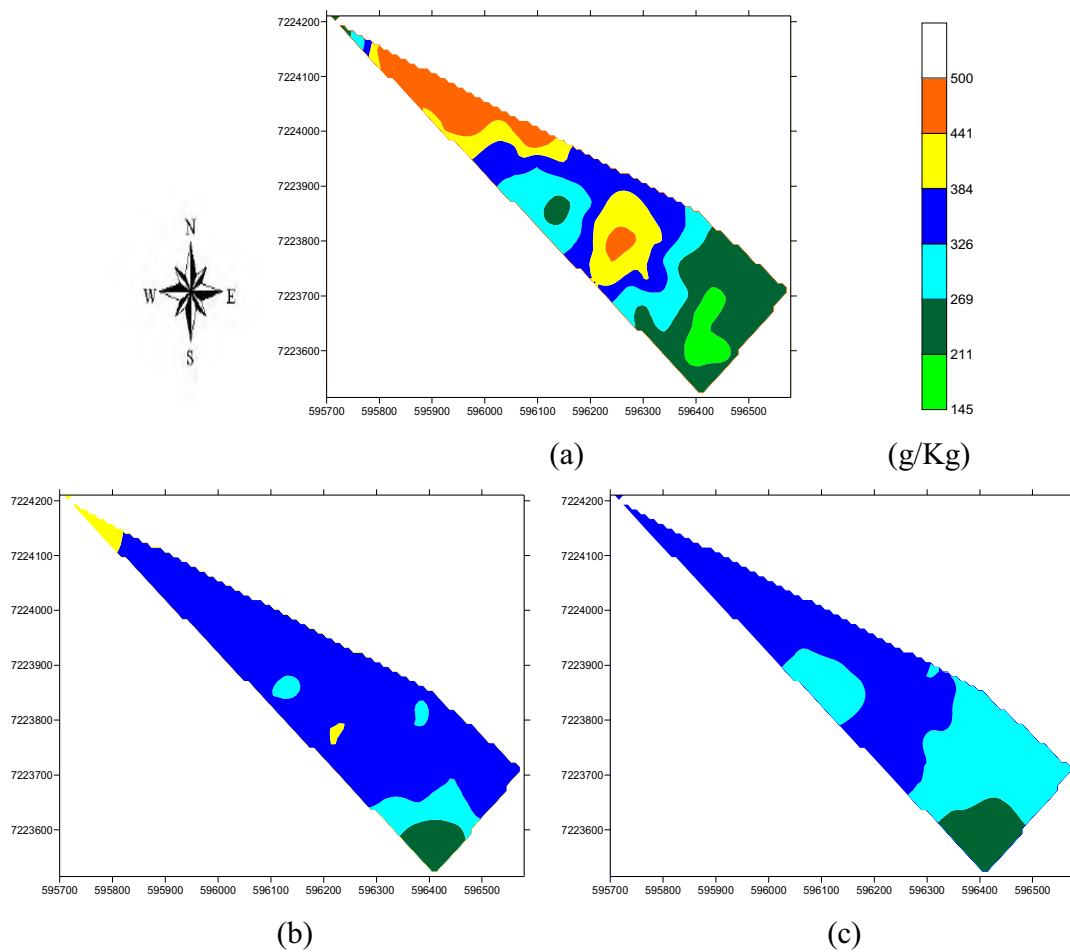
**Figura 55.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de areia do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c).

Na Figura 56, o mapa real dos teores de silte mostra níveis aumentando do extremo sul para o norte. Com relação aos mapas estimados apresenta regular semelhança com o mapa de resistência elétrica e boa semelhança com o mapa de capacitância elétrica. Comparando com os mapas da Figura 42, apresenta boa semelhança direta com o mapa de capacitância elétrica e regular semelhança invertida com o mapa de resistência elétrica.



**Figura 56.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de silte do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c).

O mapa real da Figura 57 apresenta os menores níveis de argila na extremidade sul da área em estudo, e comparando com os mapas estimados por equações apresenta fraca semelhança no centro da área com resistência elétrica e com o mapa estimado por capacitância elétrica apresenta regular semelhança na área central do experimento. Comparando com os mapas da Figura 42, apresenta boa semelhança invertida nas extremidades com o mapa de resistência elétrica e regular semelhança direta nas extremidades com o mapa de capacitância elétrica.



Escala 1:14200

**Figura 57.** Mapas da variabilidade espacial dos teores de argila do solo real (a), estimados por resistência elétrica (b) e capacitância elétrica (c).

Analisando todos os mapas dos valores reais amostrados em campo, observa-se que o mapa de resistência elétrica mostra visualmente maiores semelhanças com os mapas de teor de areia (diretamente) e argila (inversamente). O mapa de capacitância elétrica mostra maiores semelhanças diretas com os mapas de teor de silte e magnésio.

Comparando todos os mapas reais em relação aos mapas estimados pelas equações de regressão de resistência elétrica, verifica-se que as maiores semelhanças visuais resultaram nos mapas de cálcio, silte, CTC e magnésio. Comparando todos os mapas reais em relação aos mapas estimados pelas equações de regressão de capacitância elétrica, verifica-se que as maiores semelhanças visuais resultaram nos mapas de cálcio, silte, CTC, pH e magnésio.

Observa-se de forma visual conjunta dos mapas que quanto maior é o valor de capacitância elétrica o valor de resistência elétrica, é menor, e os valores das seguintes variáveis: CTC, M.O., SB, Ca, Mg, V%, pH, K e condutividade elétrica são maiores. Portanto, pode-se notar que quanto maior a capacitância elétrica concomitantemente menor a resistência elétrica e maior o valor das variáveis citadas anteriormente.

Verifica-se que a variabilidade espacial é maior nos mapas gerados pelos pontos de amostragem em campo, quando comparadas aos mapas gerados pelos dados estimados pelas equações de regressão das medidas elétricas.

Os mapas estimados pelas equações de regressão apresentaram os menores níveis das variáveis em relação aos níveis dos mapas gerados pelos pontos de amostragem em campo.

## 7 CONCLUSÕES

O sistema desenvolvido apresentou um baixo custo e a metodologia utilizada para a coleta de dados foi satisfatória, porém evidenciou a necessidade de aprimorar os coletores de informação, buscando um único aparelho que seja capaz de gravar as informações vindas do sensor e do GPS, de modo que não seja necessária a junção dos dados em planilhas de cálculo.

Para as condições em que esta pesquisa foi realizada, como local, época e clima, o sensor apresentou capacidade para medir as variações das medidas elétricas do solo, correlacionando-se satisfatoriamente com os teores de argila e areia e fracamente com o teor de umidade. Isto demonstrou a possibilidade de uso do sensor para verificar a textura do solo em áreas não homogêneas, pois quanto menor o valor da resistência elétrica do solo, a textura do mesmo tende a ser argilosa.

O teor de umidade foi maior no solo com maior teor de argila, e menor no solo com maior teor de areia. Como o teor de umidade do solo é um fator que se associa com a condutividade elétrica do solo e como esta propriedade apresentou um índice baixo de correlação tanto com resistência e capacitância elétrica, não é recomendado o uso do sensor para determinar o teor de umidade do solo.

Comparando-se os mapas das seguintes variáveis do solo: cálcio, magnésio, pH, CTC e silte, amostrados no campo com os mapas estimados pelas equações de regressão das medidas elétricas por capacitância, observa-se que os padrões de ocorrência seguem uma similaridade. Este fato indica que, no presente estudo, poderia se utilizar os mapas estimados por meio das medidas elétricas de capacitância para estimar os parâmetros do solo em locais não amostrados.

Os resultados verificados no presente estudo são promissores, pois demonstram que o sensor de medidas elétricas utilizado com o multímetro digital para medir capacitância elétrica do solo pode ser uma ferramenta útil no delineamento das unidades de gerenciamento e manejo localizado, no controle da fertilidade do solo para os seguintes atributos do solo: pH, cálcio, magnésio, SB e CTC.

O estudo espacial das variáveis foi importante por mostrar que a comparação dos mapas de superfície confirmaram os resultados das análises de correlação e determinação dos atributos do solo em relação as medidas elétricas em estudo, possibilitando assim, pesquisas futuras para gerar mapas de aplicação localizada de insumos.

Novos estudos devem ser desenvolvidos para aprimorar os resultados encontrados no projeto de pesquisa, como melhorar as desvantagens observadas na utilização do sensor de medidas elétricas.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMCHUK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T.; UPADHYAYA, S. K. On –the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 44, p. 71-91, 2004.

ALLRED, B. J.; EHSANI, R. M.; SARASWAT, D. Comparison of electromagnetic induction, capacitively-coupled resistivity, and galvanic contact resistivity methods for soil electrical conductivity measurement. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 22, n. 2, p. 215-230, 2006.

ALMEIDA, V. C.; ARAÚJO, R. L.; HOFFMANN, L. V.; FONSECA, R. G.; CARVALHO, L. P.; BARROSO, P. A. V. Comparação entre métodos de quantificação da intensidade da coloração da fibra de algodoeiros naturalmente coloridos. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO. **Anais...** Salvador, Bahia, Agosto, 2005.

ANDRADE, A. R. S.; GUERRINI, I. A.; GARCIA, C. J. B.; KATEZ I.; GUERRA, H. O. C. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 322-329, mar./abr., 2005.

ANDRADE, A. R. S. **Aplicação da teoria fractal e da geoestatística na estimativa da condutividade hidráulica saturada e do espaçamento entre drenos.** 2002. 181p, Botucatu/SP, Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

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

BANTON, O.; SEGUIN, M. K.; CIMON, M. A. Mapping field-scale physical properties of soil with electrical resistivity. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.61, 1010-17, 1997.

BATISTA I. F. **Variabilidade espacial da umidade do solo em irrigação por gotejamento sob cultivo protegido.** 2002. 113f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.215-221, 1998.

BECEGATO, V. A. **Aplicação de técnicas geofísicas e geoquímicas em duas glebas agrícolas do noroeste do estado do Paraná e suas relações com fertilizantes fosfatados.** 2005. 198 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

BERALDO, J. M. G. **Variabilidade espacial de atributos do solo e da produtividade de soja.** 2004. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.

BLANCO, F. F. **Tolerância do pepino enxertado à salinidade em ambiente protegido e controle da salinização do solo.** 1999. 104 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

BORGES, W. R. **Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade.** 2002. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2002.

CAMARGO, W. P. **Desenvolvimento de um ambiente Web para a interação entre participantes de projetos de agricultura de precisão.** 2005. 59 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.58, p.1501-1511, 1994.

CAMINHA JUNIOR, I. C.; SERAPHIM, O. J.; GABRIEL, L. R. A. Caracterização de uma área agrícola irrigada com efluente agroindustrial, através de análises químicas e da resistividade do solo. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v.13, n.4, p.40-54, 2000.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, ago. 2002.

CARVALHO, R. E.; SILVA, A. P. M. A. Capacitor cilíndrico excêntrico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 24, n. 3, 2002.

CASTIGLIONE, P; SHOUSE, P. J; WRAITH, J. M. Multiplexer-induced interference on tdr measurements of electrical conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 1453-1458, 2006.

CASTRO, C. N. **Definição de unidades de gerenciamento do solo por meio da sua condutividade elétrica e variáveis físico-químicas.** 2004. 131 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

CICHOTA, R. **Avaliação no campo de um TDR segmentado para determinação da umidade do solo.** 2003. 100 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

COELHO, A. C. S. **Avaliação do desempenho de receptores GPS em levantamentos altimétricos, para fim de sistematização de terras.** 2003. 128 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

COOK, C. M. A.; ALLEY, M. M.; ROYGARD, J. K. F.; KHOSLA, R.; NOBLE, R. B.; DOOLITTLE, J. A. Differentiating soil types using electromagnetic conductivity and crop yield map. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, p. 1562-1570, 2002.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; e BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 1013-1021, 2004.

CORWIN, D. L. Geospatial measurements of apparent soil electrical conductivity for characterizing soil spatial variability. In: J. Alvarez-Benedi and R. Munoz-Carpena (eds.), **Soil-Water-Solute Process Characterization.** CRC Press, Boca Raton, FL, p. 639-672, 2005.

CORWIN, D. L.; PLANT, R. E. Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, p. 1-10, 2005.

CREMONINI, L. C. M. **Acurácia de mapas altimétricos obtidos com DGPS na colheita de cereais**. 2002. 61 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

DAINESE, R. C.; ADAMI, M.; MOLIN, J. P.; MOREIRA, M. A. Uso do spring no processamento de dados de fertilidade do solo para uso em agricultura de precisão. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Belo Horizonte, p. 51-58, Abril, 2003.

DALGAARD, M.; HAVE, H.; NEHMDAHL, H. Soil clay mapping by measurement of electromagnetic conductivity (compact disc). In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 2001, Montpellier. **Proceedings...** Montpellier: AgroMontpellier, 2001.

DOERGE, T.; KITCHEN, N. R.; LUND, E. D. Soil electrical conductivity Mapping. **Site-Specific Management Guidelines**, n. 30, 2004. Disponível em: <<http://www.ppi-far.org/ssmg>>. Acesso em: junho de 2007.

DORIA FILHO, U. **Introdução a bioestatística: para simples mortais**. São Paulo: Negócio, 1999, 152p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212p.

FARAHANI, H.; BUCHLEITER, G. W. Temporal stability of soil electrical conductivity in irrigated sandy soils. **Transactions of the ASAE**, v. 47, n. 1, p. 79-90, 2004.

FAULIN, G. D. C. **Variabilidade espacial do teor de água e sua influência na condutividade elétrica do solo**. 2005. 52 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2005.

GALLAS, J.D. **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia de engenharia e geologia ambiental**. 2000. 174 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2000.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 650 p.

GREEN, T. R.; SCHWANK, M.; FLUEHLER, H. Laboratory Characterization of Capacitance Sensors for Measuring Soil Water Content. **Fall Meeting of the Trans American Geophysical Union**, San Francisco, CA. December 5-9, 2005.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R.; MOLIN, J. P.; MIGUEL, F. R. M.; PAVLU, F. A. Variabilidade espacial da condutividade elétrica do solo e da produtividade da mamona (*Ricinus communis* L.) no sistema de plantio direto. In: 2º. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO. **Anais...** São Pedro, SP, 2006.

GUERRA, S. P. S. **Desenvolvimento de um sistema informatizado de menor custo para aquisição e armazenamento de dados de sensores analógicos e receptor GPS**. 2006. 118 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

HARTSOCK, N. J.; MUELLER, T. G.; THOMAS, G. W.; BARNHISEL, R. I.; WELLS, K. L.; SHEARER, S. A. Soil electrical conductivity variability (compact disc). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000 Minneapolis. **Proceedings...** Madison: American Society of Agronomy, 2000.

JABRO, J. D.; EVANS, R. G.; KIM, Y.; STEVENS, W. B.; IVERSEN, W. M. Characterization of spatial variability of soil electrical conductivity and cone index using coulter and penetrometer-type sensors. **Soil Science**, v. 171, n. 8, p. 627-637, 2006.

JOHNSON, C.K.; DORAN, J.W.; DUKE, H.R.; WIENHOLD, B.J.; ESKRIDGE, K.M.; SHANAHAN, J.F. Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 1829-1837, 2001.

JOHNSON, C. K.; EIGENBERG, R. A.; DORAN, J. W.; WIENHOLD, B. J.; EGHBALL, B.; WOODBURY, B. L. . Status of soil electrical conductivity studies by central state researchers. **Transactions of the ASAE**, v. 48, n. 3, p. 979-989, 2005.

JUNG, W. K.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; KREMER, R. J.; MOTAVALLI, P. P. Relationship of apparent soil electrical conductivity to claypan soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 883-892, 2005.

KING, J. A.; DAMPNEY, P. M. R.; LARK, M.; MAYR, T. R.; BRADLEY, R. I. Sensing soil spatial variability by electromagnetic induction (EMI): it's potential in precision farming (compact disc). In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., Montpellier, 2001. **Proceedings**. Montpellier: Ecole Nationale Supérieure Agronomique, 2001.

KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G. Comparison of interpolation methods for mapping soil P and K contents. **Agronomy Journal**, Madison, v.91, p. 393-400, 1999.

LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão : fundamentos e aplicações**. Guaíba : Agropecuária, 2001. 118p.

LEAL, J. C. G. **Mapeamento da produtividade na colheita mecanizada do café**. 2002. 74 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

LOGSDON, S. D. Uncertainty effects on electrical conductivity and permittivity spectra. **Soil Science**, v. 171, p. 737-746, 2006.

LÜCK, E.; EISENREICH, M. Electrical conductivity mapping for precision agriculture (compact disc). In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., Montpellier, 2001. **Proceedings**. Montpellier: Ecole Nationale Supérieure Agronomique, 2001.

MACHADO, P. L. O. de.; BERNARDI, A. C. C.; VALENCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; SILVA, C. A.; ANDRADE, A. G. de.; MADARI, B. E.; MEIRELLES, M. S. P. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 1023-1031, jun. 2006.

MACHADO, P. L. O. de.; BERNARDI, A. C. C.; VALENCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; SILVA, C. A.; ANDRADE, A. G. de.; MADARI, B. E.; MEIRELLES, M. S. P. Mapeamento da condutividade elétrica do solo e relação com os teores de argila de um latossolo vermelho sob plantio direto de grãos no Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2004, Piracicaba. **Anais ...** Piracicaba: ESALQ/USP, 2004. p. 1-10.

MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C.; OLIVEIRA, M. Classificação da composição iônica da água de irrigação usando regressão linear múltipla. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.1, p.55-59. 2001.

MCCUTCHEON, M. C.; FARAHANI, H.; STEDNICK, J. D.; BUCHLEITER, G. W.; GREEN, T. R. Effect of soil water on apparent soil electrical conductivity and texture relationships in a dryland field. **Biosystems Engineering**, v. 94, n. 1, p. 19-32, 2006.

MENEGATTI, L. A. A. **Metodologia para identificação, caracterização e remoção de erros em mapas de produtividade**. 2002. 84 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MENEGATTI, L. A. A.; MOLIN, J. P. Mapeamento da resistência elétrica do solo por sensor de contato. In: III SIMPÓSIO SOBRE AGRICULTURA DE PRECISÃO. **Anais...** ESALQ/USP, Piracicaba: ESALQ/USP, Outubro, 2001.

MIRANDA NETO, M. I. **Investigação Geoambiental em Área de Mangue na Baía da Guanabara Contaminada com Resíduos Industriais**. 2002. 273 f. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; SCHMIDHALTER, U.; HAMMER J. Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 420-426, mai./ago. 2005.

MORETI, D. **Avaliação espaço-temporal de processos do balanços de água em um solo com citros**. 2006. 138p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

NADAI, H. L. L.; NACHREINER, M. L.; MENEGATTI, L. A. A.; MOLIN, J. P. **Estudos preliminares de um sensor de condutividade elétrica do solo para aplicação em agricultura de precisão**. 2000. Disponível em: <<http://www.ler.esalq.usp.br/download/gmap/iniciacao/EstudosPreliminaresdeumSensor2000.pdf>>. Acesso em: 20 de março 2007.

OLIVEIRA, F. D. **Mapeamento dos teores de óleo e proteína de grãos de soja e análise de sua correlação com atributos do solo**. 2003. 115 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ABREU JUNIOR, C. H. Alterações em atributos químicos de um Latossolo pela aplicação de composto de lixo urbano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.529-538, 2002.

OLIVEIRA, J.J.; CHAVES, L.H.G.; QUEIROZ, J.E.; LUNA, J.G. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Campinas, v.23, n.4, p. 783-789, Out-Dez. 1999.

PACHECO, A. O. **Aplicação do cone resistivo em solos saturados**. 2004. 150 f. Tese (Doutorado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

PAZ, E. C.; CAMPELO, N. S. Avaliação comparativa de métodos laboratoriais de medição de resistividade elétrica do solo: uma abordagem teórica. **Revista Solos e Rochas**, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo, v. 28, n. 2, 2005.

PINCELLI, A. L. S. **Desenvolvimento e ensaios de um sistema de mensuração de condutividade elétrica do solo**. 2004. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

PLACIDO, M. E. B. **Sistemas robotizados de inspeção interna de dutos**. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado). COPPE, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

QUEIROZ, S. O. P. de.; TESTEZIAF, R.; MATSURA, E. E. Avaliação de equipamentos para determinação da condutividade elétrica do solo. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 3, p. 279-287, ago./out. 2005.

RABAH, F. A. **Dependência especial de atributos do solo obtidos por meio de variogramas e autocorrelogramas**. 2002. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

RABELLO, L. M.; VAZ, C. M. P.; NETO, A. T. Sensor Capacitivo para Sondagem da Umidade no Perfil de Solo. **Comunicado Técnico, 71**, Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos, SP, novembro. 2005.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J.C.de.; CATARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação de fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RENDE, A.; BIAGE, M. Characterization of capacitive sensors for measurements of the moisture in irrigated soils. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**. Rio de Janeiro, v. 24, n.3, jul. 2002.

RIBEIRO, G. M.; MAIA, C. E.; MEDEIROS, J. F. Uso da regressão linear para estimativa da relação entre condutividade elétrica e a composição iônica da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 15-22, 2005.

ROCHA, G. C. **Estabilidade temporal da distribuição espacial da armazenagem, do gradiente de potencial total e do potencial mátrico da água, em um solo cultivado com citros**. 2004. 117p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

RODRIGUES, J. B. T. **Variabilidade espacial e correlações entre atributos do solo e produtividade na agricultura de precisão**. 2002. 116 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

RUNYAN, W. R. **Semiconductor measurements and instrumentation**. Resistivity and carrier-concentration measurements. New York: McGraw-Hill, 1975. 280 p.

SALVADOR, A. **Comparação de métodos de mapeamento da distribuição espacial da infestação de plantas daninhas**. 2002. 109 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

SHIRATISUCHI, L. S. Geração de mapas de produtividade para experimentos com milho no âmbito de fazenda. **Comunicado Técnico, 96**, Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, maio. 2003.

SILVA, R. P. **Eletrônica básica : um enfoque voltado à informática**. Florianópolis : UFSC, 2006. 312p.

SILVA, I. O. **Desenvolvimento de um sensor capacitivo para o monitoramento de umidade do solo**. 2005. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

SILVA, A. G. I.; PEREIRA, B. E. L.; LÚCIO, S. M. M. **Sensor capacitivo**. 2004. Trabalho final da Disciplina de Eletromagnetismo. Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2004. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufsj.edu.br>>. Acesso em: Junho de 2007.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S. Variabilidade especial das características químicas do solo e produtividade de milho em um argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 1013-1020, 2003.

SLOT, M. H.; GENTHNER, M. H.; DANIELS, W. L.; GROOVER, V. A. Spatial variability in Palustrine wetlands. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 527-535, 2001.

SOUZA, Z. M.; JÚNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 51-58, 2004.

STAFFORD, J. V. Implementing precision agriculture in the 21st century. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 76, p. 267-/275, 2000.

STEIDLE NETO, A. J. N.; ZOLNIER, S.; MAROUELLI, W. A.; CARRIJO, O. A.; MARTINEZ, H. E. P. Avaliação de um circuito eletrônico para medição da condutividade elétrica de soluções nutritivas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 427-435, maio/ago. 2005.

SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R. Increasing information with multiple soil electrical conductivity datasets. In: ASABE Annual International Meeting Technical Papers. **ASABE Annual Meeting**, Portland, Oregon. July 9-12, 2006.

SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R. Mapping soil electrical conductivity. In: Stamatiadis, S., Lynch, J.M., Schepers, J.S. editors. **Remote Sensing for Agriculture and the Environment**. Peripheral Editions, Larissa, Greece, p. 188-201, 2004.

TAKEDA, Y. E. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo**. 2000. 87 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2000.

TERRA, J. A.; SHAW, J. N.; REEVES, D. W.; RAPER, R. L.; VAN SANTEN, E.; MASK, P. L. Soil carbon relationships with terrain attributes, electrical conductivity surveys and soil map units in a coastal plain landscape. **Soil Science**, v. 169, p. 819-831, 2004.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, 2002.

VALERO, R. M. M. **Uso da técnica da “TDR” na estimativa da umidade e condutividade elétrica em substratos orgânicos**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

VANNI, S. M. **Modelos de regressão: estatística aplica**. São Paulo: Legmar Informática e Editora, 1998. 177p.

VETTORATO, J. A. **Mapeamento da fertilidade do solo utilizando sistema de informação geográfica**. 2003. 84f. Dissertação Mestrado em Agronomia - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

VICENTE, J. **Estudo comparativo de métodos geoestatísticos aplicados em agricultura de precisão**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2004.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, P.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1. p.1-54, 2000.

ZHANG, N.; WANG, M.; WANG. N. Precision agriculture/a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 36, p. 113-132, 2002.

ZHANG, R.; WIENHOLD, B. J. The effect of soil moisture on mineral nitrogen, soil electrical conductivity, and pH. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 63, p. 251-254, 2002.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.