**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E
RESPOSTA ESPECTRAL DA CULTURA DE FEIJÃO IRRIGADO, EM
IMAGENS AÉREAS DIGITAIS**

AXEL GARCÍA Y GARCÍA
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. CARLOS ALBERTO VETTORAZZI

Dissertação apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade
de São Paulo, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia, Área de Concentração:
Irrigação e Drenagem

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Agosto - 1997

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/USP

García y García, Axel

Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e resposta espectral da cultura de feijão irrigado, em imagens aéreas digitais / Axel Garcia y García. - - Piracicaba, 1997.

79 p. : il.

Dissertação (mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997.
Bibliografia.

1. Água no solo 2. Feijão 3. Irrigação (manejo) 4. Sensoriamento remoto 5.
Variabilidade espacial I. Título.

CDD 631.4
635.652
631.7

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E
RESPOSTA ESPECTRAL DA CULTURA DE FEIJÃO IRRIGADO, EM
IMAGENS AÉREAS DIGITAIS**

AXEL GARCÍA Y GARCÍA

Aprovada em: 23.09.97

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Carlos Alberto VETTORAZZI

Prof. Dr. Marcos Vinicius FOLEGATTI

Prof Dr. Jansley Vieira ROCHA

ESALQ/USP

ESALQ/USP

FEAGRI/UNICAMP

Prof. CARLOS ALBERTO VETTORAZZI
(Orientador)

Aos meus pais:

Gaudencio Garcia Herrera (in memoriam)

Aida Marina García

DEDICO

À minha família

OFEREÇO

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Vettorazzi pela orientação amizade e liberdade em mim depositada para a execução do trabalho.

Aos professores: Dr. Marcos Vinicius Folegatti e Dr. Durval Dourado-Neto, pelas valiosas sugestões para o melhoramento do documento final e pela filosofia de trabalho.

Aos professores Dr. Sérgio Moraes e Mestre Maria I. F. Alves, pelas sugestões na parte estatística.

Ao "Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas" da Guatemala, ICTA, pela oportunidade.

Aos professores do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP pelos ensinamentos e amizade.

Ao Departamento de Agricultura: pelo apoio incondicional para a utilização da área do pivô central.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela bolsa de estudos.

A Ricardo Fietz, Doutorando em Irrigação e Drenagem pelo DER-ESALQ/USP e pesquisador da EMBRAPA/CPAO, Dourados-RS, pelas valiosas sugestões ao trabalho, além das correções ao meu portunhol.

A Antônio Carlos de A. Gonçalves, Doutorando em Irrigação e Drenagem pelo DER-ESALQ/USP e Prof. da Universidade Estadual de Maringá -PR, por ter me iniciado e encorajado no estudo da Geoestatística.

A Selma Regina Maggiotto: na distância, a sua presença e parceria me encorajaram em todo momento.

A Eliana Maria Garcia Sabino e Katia Maria de Andrade Ferraz pelas discussões quanto às normas e referências bibliográficas.

Aos colegas do Curso de Irrigação e Drenagem do DER-ESALQ/USP pelas parcerias ao longo do curso e por terem me integrado à comunidade brasileira: obrigado!.

À comunidade de estrangeiros da ESALQ, especialmente a Ariel Ortiz, Efrain Chandia, Jorge Láinez, Bruno Zachrisson, Alvis Adames, Mario Caviedes e Juan Salguero.

Ao técnico Jesuino Ferrari e aos estagiários Fábio Baio e Samir Cury pela colaboração na parte topográfica, e à estagiária Paula M. Antunes do Departamento de Agricultura, pela valiosa colaboração no manejo da cultura e da irrigação.

Aos funcionários do DER-ESALQ/USP: Hélio Toledo Gomes, , Antonio César S. Rocha, José Figueredo, e Gilmar B. Grigolon.

Aos colegas de República: Adonis Moreira, Alexandre Heinneman, Alexandre Jordão, Edson Martins e Ronaldo Fernandes; pelos bons momentos e pelo silêncio!.

AGRADEÇO

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE QUADROS	x
RESUMO	xi
SUMMARY	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 A água no solo	3
2.2 A variabilidade espacial de parâmetros relativos ao solo	6
2.2.1 A estatística “clássica” e a análise exploratória de dados no estudo de atributos do solo	7
2.2.1.1 As medidas de posição e de dispersão.....	8
2.2.1.2 Análise exploratória de dados.....	9
2.2.2 A teoria das variáveis regionalizadas.....	11
2.2.2.1 Definições básicas	12
2.2.2.2 O semivariograma	13
2.2.2.3 A Krigagem.....	17
2.3 Sensoriamento remoto	18
2.3.1 Fotografias convencionais e digitais.....	21
2.3.2 Utilização de semivariogramas em imagens digitais.....	23
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1 Caracterização da área de estudo.....	25
3.2 A cultura.....	25
3.3 Atributos do solo	27
3.3.1 Granulometria do solo.....	27
3.3.2 Potencial mátrico da água no solo	27
3.4 Esquema experimental de amostragem	27
3.5 Imagens aéreas.....	28

3.5.1 Obtenção de imagens aéreas.....	28
3.5.2 Tratamento das imagens aéreas	30
3.6 Análises estatísticas.....	31
3.6.1 Análises descritivas	31
3.6.2 Aplicação da teoria das variáveis regionalizadas	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 Análise descritiva	35
4.1.1 Granulometria.....	35
4.1.2 Potencial mátrico	37
4.2 Análise geoestatística	43
4.2.1 Granulometria.....	43
4.2.2 Potencial mátrico	46
4.3 Imagens aéreas.....	52
4.3.1 Análise digital	52
4.3.2 Dependência espacial do valor dos “pixels”	55
4.4 Rendimento obtido.....	60
4.5 As limitações do trabalho	61
5. CONCLUSÕES.....	62
ANEXO A	63
ANEXO B	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
APÊNDICE 1	80
APÊNDICE 2	81

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Esquema do semivariograma.....	14
2. Curva de resposta espectral de uma folha típica.....	19
3. Relevo da área experimental.....	26
4. Localização dos tensiômetros na área experimental	28
5. Esquema do critério utilizado para definir a barreira de dados periféricos ou “outliers”. (Adaptado de Hoaglin, 1983).....	32
6. Distribuição da chuva no período em que foi realizado o experimento. As setas pequenas fazem referência às irrigações realizadas e as setas maiores às missões de vôo e leitura dos tensiômetros.....	34
7. Diagrama de ramos e folhas para (a) argila,(b) silte e (c) areia.	36
8. Gráficos “box-plot” para (a) argila, (b) silte e (c) areia	36
9. Gráfico de probabilidade normal e reta de Henry para (a) argila, (b) silte e (c) areia.....	37
10. Diagrama de ramos e folhas para o potencial mátrico (kPa) em (a) 12/05/97, (b) 21/05/97, (c) 27/05/97 e (d)25/06/97.	39
11. Gráfico “box-plot” do potencial mátrico em (a) 12/05/97, (b) 21/05/97, (c) 27/05/97 e (d) 25/06/97.	41
12. Gráfico de probabilidade normal e reta de Henry do potencial mátrico em (a) 12/05/97, (b) 21/05/97, (c) 27/05/97 e (d) 25/06/97	42

13. Variogramas para (a) argila e (b) areia.....	44
14. Distribuição espacial do conteúdo de argila no solo da área experimental	45
15. Distribuição espacial do conteúdo de areia no solo da área experimental.....	46
16. Semivariogramas para o potencial mátrico (kPa) em (a) 12/05/97, (b)21/05/97, (c) 27/05/97 e (d) 25/06/97	47
17. Variabilidade espacial do potencial mátrico em 12/05/97 (45DAS)	49
18. Variabilidade espacial do potencial mátrico em 21/05/97 (52 DAS)	50
19. Variabilidade espacial do potencial mátrico em 27/05/97 (60 DAS)	51
20. Variabilidade espacial do potencial mátrico em 25/06/97 (85 DAS)	52
21. Resultado da análise de agrupamento nas fotografias aéreas obtidas com a câmara Minolta em (a) 12/05/97, (b) 21/05/97, (c) 27/05/97 e (d) 25/06/97	53
22. Resultado da análise de agrupamento para imagem obtida com a câmara Dycam ADC em 12/05/97	55
23. Semivariogramas para imagens obtidas com a câmara Minolta em (a) 12/05/97, (b) 21/05/97, (c) 27/05/97 e (d) 25/06/97	56
24. Semivariograma para imagem obtida com a câmara Dycam em 12/05/97	57
25. Resultado das simulações das imagens obtidas com a câmara Minolta em (a) 12/05/97, (b) 21/05/97, (c) 27/05/97 e (d) 26/05/97	59
26. Resultado da simulação da imagem obtida com a câmara Dycam ADC em 12/05/97	60

LISTA DE TABELAS

	Página
1. Principais janelas atmosféricas do espectro eletromagnético	20
2. Resumo estatístico da granulometria da área experimental.....	35
3. Resumo estatístico do potencial mátrico (ψ_m , kPa) após irrigação, nas diferentes datas de leitura dos tensiômetros	38
4. Resumo estatístico do potencial mátrico (ψ_m , kPa) após irrigação e após retirada dos dados considerado periféricos	43
5. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas para os atributos do solo.....	47
6. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas das imagens obtidas com a câmara Minolta nas quatro missões de vôo.....	57

LISTA DE QUADROS

	Página
1. Comparação entre filmes fotográficos e imagens eletrônicas	21
2. Especificações básicas da Dycam ADC (Agricultural Digital Camera)	29

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E
RESPOSTA ESPECTRAL DA CULTURA DE FEIJÃO IRRIGADO, EM
IMAGENS AÉREAS DIGITAIS**

Autor: AXEL GARCÍA Y GARCÍA

Orientador: Prof. Dr. CARLOS ALBERTO VETTORAZZI

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivos: (a) estudar a variabilidade espacial dos componentes granulométricos e do potencial mátrico da água no solo; e (b) avaliar a viabilidade de utilização de fotografias aéreas no formato digital para o manejo da irrigação, através do comportamento espectral das plantas em função da variabilidade espacial de alguns atributos do solo. A cultura utilizada foi o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), irrigado por aspersão tipo pivô central.

O ensaio foi realizado na área experimental do Departamento de Agricultura da ESALQ/USP, em Piracicaba (SP) e o plantio foi feito em 26 de março de 1997. Foram instalados 188 tensiômetros numa malha irregular, a uma profundidade de 0,20m segundo as linhas em nível da semeadura e entre plantas. À mesma profundidade e a 0,20m dos tensiômetros, foi retirado igual número de amostras de solo para análise granulométrica. Realizaram-se 4 missões de vôo para a obtenção das fotografias aéreas a uma altura aproximada de 350m, aos 45, 52, 60 e 85 dias após o plantio. Paralelamente, fez-se a leitura dos tensiômetros.

Os atributos do solo foram analisados pela estatística clássica ou de Fisher; utilizou-se a análise exploratória de dados para definição de valores periféricos e,

finalmente, aplicou-se a teoria das variáveis regionalizadas para conhecer a estrutura espacial das variáveis.

As fotografias aéreas foram transformadas para o formato digital utilizando-se um “scanner” HP ScanJet-4c. Em seguida, foi utilizado o “software” Idrisi (Versão 1.0) para fazer as correções geométricas pelo método dos vizinhos mais próximos, bem como a classificação. Foi utilizada a classificação não-supervisionada, através da análise de agrupamentos (“Cluster”), fazendo-se três agrupamentos para cada imagem tratada.

Os resultados mostraram dependência espacial do conteúdo de argila e areia e do potencial mátrico, tendo-se ajustado aos semivariogramas de argila e areia um modelo esférico e, o modelo exponencial foi modal para os semivariogramas do potencial mátrico. Foram gerados mapas de isolinhas e de três dimensões utilizando-se a técnica da krigagem.

Não houve correlação linear entre o valor digital dos “pixels” das imagens nos pontos tensiométricos e os atributos do solo. Aplicou-se a teoria das variáveis regionalizadas ao valor dos “pixels”, encontrando-se dependência espacial da resposta espectral da cultura.

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL PHYSICAL PARAMETERS AND SPECTRAL RESPONSE OF IRRIGATED CROP BEANS, IN AERIAL IMAGES

Author: AXEL GARCÍA Y GARCÍA

Adviser: Prof. Dr. CARLOS ALBERTO VETTORAZZI

SUMMARY

This work was made with the following objectives: (a) to study, in the experimental area, the spatial variability of texture and matric potential of soil water and; (b) to evaluate the feasibility to use aerial photographs in digital format for irrigation management, by the spectral response of plants caused by the spatial distribution of some soil parameters. It was utilized a bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.), irrigated by center pivot.

The experiment was carried out in the experimental area of the Department of Agriculture of ESALQ/USP, in Piracicaba (SP, Brazil) and the planting was made in March 26, 1997. One hundred and eighty eight tensiometers were installed in an irregular grid at depth of 0.20m in the lines of planting and between plants. Soil samples was obtained in each point of tensiometer (0.20m apart) at the same depth, for granulometric analysis. Four flying missions were made using an small airplane at 45, 52, 60 and 85 days after planting. Tensiometers reading were made at the same time.

The physical soil parameters were analyzed by the classic or Fisher statistic; exploratory data analysis for defining outliers data and the regionalized variables theory.

The aerial photos were transformed into digital format through an HP ScanJet-4c scanner. Using the Idrisi software (v.1) a geometric corrections was performed by the nearest neighbor method as well as a digital classification utilizing an unsupervised method (cluster analysis).

It was found spatial structure for clay, sand and matric potential and the spherical model was fitted for the texture and the exponential model was modal for the matric potential.

There was no linear correlation between soil parameters and the pixels values. Regionalized variables were used with the pixels values and it was found structure dependence of the plants spectral responses.

1. INTRODUÇÃO

No processo de produção agrícola, a otimização dos seus diferentes componentes é de fundamental importância, para poder suprir as necessidades atuais e futuras de segurança alimentar e poder concorrer no mercado internacional. Assim, é imperativa a utilização de técnicas econômicas e ecológicas para suprir essas necessidades.

O conhecimento da distribuição espacial de atributos do solo é objeto de estudo desde o início do século. Recentemente, com a aplicação da teoria das variáveis regionalizadas na ciência agrônômica, pode-se descrever e quantificar a variabilidade espacial desses atributos tanto na área de pesquisa como em aplicações visando à otimização da produção agrícola.

A distribuição espacial da granulometria e do potencial total da água no solo favorece a avaliação da disponibilidade hídrica para as plantas na zona radicular, e as dificuldades implícitas na amostragem desses atributos (altos custos, dispositivos experimentais complexos etc.), podem ser reduzidas com a utilização da geoestatística na aplicação de métodos de interpolação.

Como a irrigação garante a produção agrícola em épocas ou regiões de baixa pluviosidade, o planejamento e o manejo corretos dos recursos hídricos são cada vez mais necessários para um desenvolvimento economicamente adequado das culturas irrigadas. À escala de parcela agrícola, o sensoriamento remoto ao nível aéreo, é atualmente motivo de estudos visando à sua utilização no monitoramento da agricultura nas suas diferentes fases. Nesse contexto, os sistemas fotográficos continuam sendo de indiscutível valor para a aquisição de dados em sensoriamento remoto, permitindo a obtenção de imagens da superfície terrestre com boa resolução espacial e de interpretação relativamente fácil.

No desenvolvimento desses sistemas fotográficos, têm-se atualmente câmaras que produzem imagens digitais nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo, para o seu uso na agricultura. Essas câmaras digitais apresentam diversas vantagens sobre as convencionais, como a rápida disponibilidade das imagens e em formato compatível com o computador, o que permite um processo digital mais dinâmico e facilidade de armazenamento, de manuseio e de transmissão dessas imagens.

Uma vez que as imagens são a representação da energia refletida pelos alvos, espera-se que essas sejam capazes de mostrar a variabilidade espacial do vigor de uma planta. Além disso, é de esperar que a variabilidade espacial da resposta espectral de uma cultura seja o resultado, entre outros fatores, da variabilidade espacial de atributos físicos do solo.

Os objetivos do trabalho foram: (a) estudar a variabilidade espacial dos componentes granulométricos e do potencial mátrico da água no solo; e (b) avaliar a viabilidade de utilização de fotografias aéreas no formato digital para o manejo da irrigação, através do comportamento espectral das plantas, em função da variabilidade espacial de alguns atributos do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A água no solo

O conhecimento da disponibilidade de água nos solos agrícolas é importante para o desenvolvimento adequado das culturas. Essa disponibilidade de água varia espacial e temporalmente devido à granulometria do solo e ao potencial total, sendo o componente mais importante, para o caso de solos agrícolas, o potencial mátrico (Reichardt, 1996). Devido à sua complexidade, o potencial mátrico não pode ser medido diretamente. Na prática, a utilização de tensiômetros permite estimar o potencial mátrico a partir da mensuração de pressão no centro geométrico da cápsula porosa assumindo equilíbrio estático.

Para garantir a qualidade dos dados obtidos com os tensiômetros, Libardi (1996) menciona que as cápsulas devem ser avaliadas quanto a condutância hidráulica (método de carga decrescente) e à pressão de borbulhamento.

Existem diferentes tipos de tensiômetro em função do dispositivo de medida e, entre os mais utilizados em pesquisa estão: (a) os de manômetro de mercúrio (Libardi, 1995; Reichardt, 1996); e (b) os de transdutor de pressão (ou punção digital) no lugar da coluna de mercúrio. As bases teóricas que originaram esses últimos são apresentadas por Thiel et al. (1963).

Marthaler et al. (1983) trabalhando com tensiômetros de transdutor de pressão, encontraram alta correlação quando os dados foram comparados com os de tensiômetros com manômetro de mercúrio.

Trabalhando com tensiômetros de transdutor de pressão, Hamlett et al. (1986) utilizaram a análise exploratória de dados para conhecer a variabilidade espacial do potencial mátrico da área em estudo.

Em relação à distribuição da água no solo, sabe-se que quando cessa a chuva ou a irrigação e a reserva de água na superfície do solo se esgota, o movimento de água ao longo do perfil persiste por mais tempo, com a água movendo-se para camadas mais profundas, principalmente sob influência do potencial gravitacional. Esse fenômeno pós-infiltração é denominado de redistribuição e se caracteriza por aumentar a umidade de camadas mais profundas a expensas da água contida nas camadas superficiais, inicialmente umidecidas (Reichardt, 1996).

Diferentes pesquisas têm mostrado a importância da redistribuição de água no solo em relação à distribuição da água na superfície com os equipamentos de irrigação.

Segundo Hart (1972), a avaliação de aspersores, pelas medidas de superfície, subestima a sua uniformidade, a qual atinge o seu máximo mais facilmente quando a aplicação é feita a uma taxa mais elevada. O mesmo autor cita que a redistribuição é maior quando o solo apresenta uma umidade inicial mais alta. Paiva (1980), Penaforte (1992) e Rezende et al. (1993) acrescentam que as maiores variações de uniformidade ocorrem nas camadas superiores. Os mesmos autores afirmam que para baixas uniformidades de aplicação, em curtos espaços de tempo, a uniformidade da umidade alcança valores altos.

A granulometria do solo é um parâmetro que é ligado à disponibilidade de água para as culturas e diversos esforços têm sido feitos para encontrar uma relação funcional entre a parte granulométrica e a umidade.

Arruda et al. (1987) propõem modelos empíricos para vários tipos de solos que relacionam o conteúdo de argila+silte com o conteúdo de água à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente, como solução prática na falta de dados sobre outros atributos físico-hídricos do solo.

Nandagiri e Prasad (1997) avaliam modelos baseados na textura para estimar a umidade do solo. Os resultados, quando comparados com experimentos paralelos no laboratório e no campo foram pouco consistentes.

Existem diferentes métodos para a medida da disponibilidade de água no solo, sendo os mais comuns: a) a panela de pressão de Richards; e b) a utilização combinada de tensiômetros e sonda de nêutrons. Em ambos os casos, relaciona-se a umidade com o potencial da água sendo que, teoricamente, os tensiômetros têm o seu funcionamento limitado até uma atmosfera de pressão. No caso da panela de Richards, onde a água é removida por aplicações crescentes de pressão, para os valores de potencial e umidade pode-se depois fazer uma curva, que é conhecida como **curva característica da umidade do solo ou curva de retenção** (Libardi, 1995; Reichardt, 1996; Nandagiri e Pressad, 1997).

Uma das maiores dificuldades no estudo de atributos do solo é a obtenção do número necessário de amostras para se ter valores que representem adequadamente as condições do fenômeno de interesse “in situ” (Cline, 1944; Nielsen, 1973).

Vauclin et al. (1983), Vieira et al. (1983) e Trangmar et al. (1985) coincidem em que as principais dificuldades operacionais para se obter o número necessário de amostras são os altos custos e as características dos dispositivos experimentais necessários. Então, a variabilidade espacial inerente aos solos, é uma limitação analítica que nem sempre é resolvida pela estatística clássica ou de Fisher e que, inclusive, trouxe como resultado a aplicação de outras metodologias, como a teoria das variáveis regionalizadas, desenvolvida por Matheron (1971), ao estudo da variabilidade espacial de atributos relativos ao solo.

Vauclin et al. (1983) encontraram correlação linear entre os componentes texturais e o conteúdo de água disponível, obtendo a melhor correlação entre o conteúdo de areia e a disponibilidade de água no solo a 33,77 kPa. Ainda esses autores, utilizando a teoria das variáveis regionalizadas e o método de co-krigagem, encontraram correlação espacial entre o conteúdo de areia e a disponibilidade de água a 33,77 kPa a distâncias de 43,5m e 30m respectivamente.

2.2. A variabilidade espacial de atributos relativos ao solo

O interesse pelos problemas relacionados com a variabilidade espacial de atributos relativos aos solos data desde o início do século. Vieira et al. (1983) discutem amplamente as origens da importância da variabilidade espacial na área de Agronomia e apresentam uma ampla discussão sobre a teoria das variáveis regionalizadas e sua aplicação em estudos de solos.

Cline (1944) cita que a acurácia com que uma amostra de solo representa a população amostrada depende da variabilidade do solo, do número de amostras obtidas e da direção de amostragem. O autor reconhece, assim, que as condicionantes nos estudos do solo, são tanto a dependência espacial quanto a anisotropia de atributos do solo.

Nielsen et al. (1973) estudaram a variabilidade espacial de algumas propriedades físicas do solo. Os resultados permitiram delimitar áreas para mapeamento de unidades de solo.

A variabilidade espacial dos solos e a sua importância na experimentação agrícola é abordada amplamente numa revisão bibliográfica realizada por Reichardt et al. (1986). Os autores discutem a importância da teoria das variáveis regionalizadas para o melhor conhecimento das características do solo em relação ao seu grau de dependência no espaço.

Como o tamanho e distribuição das partículas do solo estão relacionados com a disponibilidade de água para as plantas (Reichardt, 1996), é evidente que a textura do solo é ligada a essa disponibilidade de água para as culturas.

Smith et al. (1989) estudaram a temperatura radiativa da superfície com imagens aéreas de uma cultura de trigo sob estresse hídrico, com o objetivo de procurar fontes de variabilidade nas características do solo que afetaram a disponibilidade de água. A teoria das variáveis regionalizadas permitiu localizar as fontes de variabilidade espacial da umidade no solo da área estudada.

Vieira et al. (1981) estudaram a variabilidade espacial da taxa de infiltração no campo utilizando uma grade irregular, obtendo conclusões para a recomendação do número mínimo de amostras para a medida da infiltração.

Borgelt et al. (1994) fizeram aplicações diferenciadas de calagem baseados na teoria das variáveis regionalizadas. Determinaram-se áreas de sobreaplicação e de subaplicação, objetivando à maximização dos benefícios na aplicação de doses de calcário nos locais diferenciados.

Mallants et al. (1996) quantificaram a variabilidade espacial e a correlação cruzada espacial em valores de parâmetros estimados por modelos de ajuste de curvas, a dados de retenção medidos. É determinada a dependência espacial de alguns parâmetros do modelo de van Genuchten para distâncias próximas aos 4,0m.

Dourado-Neto (1989) estudando a variabilidade espacial da altura de chuva de aspersores e do potencial da solução no solo encontrou dependência espacial dos atributos estudados e discute a dificuldade de se trabalhar com tensiômetros, devido aos erros inerentes ao aparelho.

2.2.1. A estatística “clássica” e a análise exploratória de dados no estudo de atributos do solo

Face às dificuldades mostradas pela estatística clássica (entende-se por estatística clássica aquela que utiliza a média e o desvio padrão para representar um conjunto de dados, e baseia-se na hipótese principal de que as variações de um local para outro são aleatórias) no estudo de atributos do solo (Trangmar et al., 1985; Hamlett et al., 1986; Reichardt et al., 1986; Dourado-Neto, 1989; Moraes et al., 1993; Libardi et al., 1996); adquire importância a realização de um resumo estatístico para conhecer as medidas de posição e dispersão dos dados (Libardi et al., 1996), seguido pela análise exploratória (Emerson e Hoaglin, 1983; Hoaglin, 1983; Emerson e Stranio, 1983; Barnett e Lewis, 1984; Hamlett et al., 1986; Alves, 1987; Libardi et al., 1996; Varekamp et al., 1996) e, dependendo dos objetivos do trabalho, a aplicação da teoria das variáveis regionalizadas desenvolvida por Matheron (1971).

2.2.1.1. As medidas de posição e de dispersão

As medidas de posição usuais nos estudos de solos são a moda (M_o , o valor que apresenta maior frequência), a mediana (M_d , eq. 1) e a média aritmética (X_m , eq. 2). Havendo distribuição normal, os valores das três medidas são coincidentes. Outra medida de posição bastante utilizada em dados de distribuição lognormal é a média geométrica (X_g , eq. 3), a qual é definida como a raiz n do produto de n medidas e equivale ao antilogaritmo da média dos valores de dados com transformação logarítmica (Libardi et al., 1996; Parkin e Robinson, 1992).

$$M_d = \frac{1}{2} [x_k + x_{(k+1)}] \quad (1)$$

$$X_m = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2)$$

$$X_g = \sqrt[n]{x_1 x_2 x_3 \dots x_n} = \left(\prod_{i=1}^n X_i \right)^{1/n} \cong \exp(\bar{y}) \quad (3)$$

em que x_k e $x_{(k+1)}$ é o intervalo que contém o ponto mediano dos dados ordenados, n é o número de dados; $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ são os valores desde $i=1$ até n e, $\bar{y}$ é a média aritmética dos valores com transformação logarítmica neperiana.

As medidas de dispersão ou variabilidade são a amplitude total (R , eq. 4), o desvio padrão (σ , eq. 5), o coeficiente de variação (CV , eq. 6), a assimetria (b_1 , eq. 7) e a curtose (b_2 , eq. 8).

$$R = X_{\max} - X_{\min} \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2}{(n-1)}} \quad (5)$$

$$CV(\%) = \frac{\sigma}{X_m} 100 \quad (6)$$

$$b_1 = \frac{m_3}{\sigma^2} \quad (7)$$

$$b_2 = \frac{m_4}{\sigma^2} \quad (8)$$

onde $X_{\max}$ e $X_{\min}$ correspondem aos valores máximo e mínimo dos dados; X_i é o i -ésimo valor observado; n o número de dados; e σ^2 , m_3 e m_4 são respectivamente, o segundo, terceiro e quarto momentos centrados na média.

Libardi et al. (1996) explicam amplamente a razão de utilizar várias medidas de dispersão, sendo que a amplitude total (R) está ligada à simetria da distribuição ou presença de dados periféricos; o desvio padrão como estatística de avaliação da variabilidade dos dados na unidade de medida original; o coeficiente de variação apresenta a dispersão independentemente das unidades de medida, o que permite a comparação entre parâmetros com unidades diferentes; e o coeficiente de curtose, uma vez verificada a simetria, completa a identificação da distribuição empírica como normal.

2.2.1.2. Análise exploratória de dados

As técnicas clássicas da estatística foram delineadas para serem as melhores possíveis sob rigorosas suposições. Porém, nem sempre têm adequado comportamento quando as situações reais não apresentam tais suposições. A análise exploratória é um estágio inicial para descobrir as propriedades estatísticas e matemáticas dos dados e que, melhora a eficiência da análise estatística (Alves, 1987; Varekamp et al., 1996).

Ainda Hamlett et al. (1986) mencionam que a análise exploratória de dados é uma técnica cujos resultados são utilizados no auxílio da modelagem da estrutura espacial dos dados.

Entre as diferentes técnicas utilizadas na análise exploratória de dados, têm-se: a) o dispositivo de ramos e folhas e, b) o “boxplot”. O dispositivo de ramos e folhas possibilita tanto ver o grupo como um todo, quanto observar características tais como: a) quanto o grupo está próximo da simetria; b) como estão distribuídos os valores; c) se alguns valores estão distanciados dos demais; d) se existe concentração de dados; e) se existem lacunas nos dados. Em outras palavras, o dispositivo de ramos e folhas é similar a um histograma na apresentação dos dados e os “outliers” são imediatamente localizados (Hamlett, 1986; Alves, 1987).

Detalhes quanto a construção e aplicações do dispositivo de ramos e folhas podem ser encontrados em Emerson e Hoaglin (1983), Alves (1987) e Libardi et al. (1996)

Segundo Barnett e Lewis (1984), “outlier” é um dado que aparenta estar marcadamente desviado do resto do grupo de amostras em que ocorre.

O “boxplot” é um dispositivo gráfico que é construído desenhando-se uma caixa com extremidades nos quartos inferior e superior e com uma barra na mediana. Em seguida, traça-se uma linha até os pontos mais afastados da caixa que não são “outliers”, os quais são representados individualmente por pontos situados além dos limites críticos para dados periféricos. Cada “boxplot” mostra as seguintes características da estrutura do grupo: a) posição, resumida pela mediana; b) dispersão, dada pela dispersão-F e mostrada pelo comprimento da caixa; c) assimetria, em função das posições da mediana e dos quartos; d) distribuição; e) “outliers” (Emerson e Strenio, 1983; Alves, 1987; Libardi et al., 1996).

Uma estatística de interesse no estudo de uma variável é a dispersão. Quando se trabalha com variáveis com tendência a se ter valores periféricos, uma indicação de como os dados estão concentrados é a dispersão dos quartos, dF , que é uma medida simples e resistente de dispersão (Hoaglin, 1983; Alves, 1987). Utilizando essa definição, Libardi et

al. (1996) definiram barreiras para dados candidatos a periféricos e, seguidamente, fizeram mapas de distribuição espacial da umidade à base de massa.

Hamlett et al. (1986) utilizaram a análise exploratória de dados como ferramenta para definir valores periféricos em dados de potencial mátrico, fazendo semivariogramas para definir a estrutura espacial desse parâmetro.

Libardi et al. (1996) caracterizaram a variabilidade espacial da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico utilizando a técnica da análise exploratória de dados para confirmar a escolha das medidas de posição (média e mediana) face a problemas de valores periféricos (candidatos a “outliers”).

2.2.2. A teoria das variáveis regionalizadas

A estatística clássica não leva em conta a dependência espacial das amostras e considera que a variação é randomicamente distribuída. Assim, utilizando a estatística clássica, o valor esperado de uma propriedade z do solo em qualquer local é:

$$Z(x) = \mu + \varepsilon(x) \quad (9)$$

onde $Z(x)$ é o valor esperado, e $\varepsilon(x)$ é o valor residual ou a variação aleatória dos valores em torno da média, assumidos como normalmente distribuídos. Em outras palavras, tem-se na eq. (9) que cada valor de Z é independente da posição em relação aos outros. Porém, atualmente sabe-se que diversas propriedades do solo são variáveis contínuas cujos valores esperados em cada local variam em função da direção e da distância de separação da amostra vizinha. A estatística clássica não explica esse fato (Borgelt, et al., 1994).

A evolução da análise estatística de atributos relativos ao solo é discutida por Reichardt et al. (1986) principalmente com relação à variabilidade espacial desses atributos. Vieira (1997) menciona que essa variabilidade é uma preocupação dos

pesquisadores desde o início do século. Ainda Folegatti (1996), cita que a heterogeneidade é uma característica inerente ao solo.

A teoria das variáveis regionalizadas ou geoestatística, desenvolvida por Matheron (1971) e recentemente aplicada a estudos na área de Agronomia e de propriedades físico-hídricas do solo (Vieira et al., 1981; McBratney e Webster, 1986; Moraes et al., 1993; Folegatti, 1996) descreve quantitativamente a variação espacial das propriedades do solo.

Vieira et al. (1981) definem variável regionalizada como uma função espacial numérica que varia de um local para outro, com uma continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples. Essa continuidade ou dependência espacial pode ser estimada através do semivariograma. A Geoestatística tem um método de interpolação chamado Krigagem, o qual usa a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima. Essas duas características fazem da krigagem um interpolador ótimo (Vieira, 1997).

2.2.2.1. Definições básicas

A geoestatística consiste na amostragem de acordo com um plano espacial; sendo a medida ou amostra regionalizada: a) segundo transeções em dada direção x , podendo ser cada local de amostragem equidistante do outro, de uma distância h denominada lag (espaçamento); ou b) segundo uma malha nas direções x e y podendo cada medida ser espaçada de h constante. A amostragem a distância constante não é estritamente necessária nos dois casos, desde que se conheça a posição relativa de cada amostra (Reichardt et al., 1986).

Cressie (1993) resume no modelo espacial apresentado na eq. 9 a definição de variáveis regionalizadas, conforme a relação seguir:

$$\{Z(S); S \in D \subset R^d\} \quad (10)$$

onde Z é o conjunto de variáveis aleatórias no ponto S , que pertence a um certo domínio D , contido nas coordenadas R^d ($d = 1, 2, 3, \dots$, dimensões).

Segundo Vieira (1997), um dos métodos mais antigos de se estimar a dependência no espaço ou no tempo de amostras vizinhas é através da autocorrelação. Porém, quando as amostras forem coletadas nas duas dimensões do campo e for necessária a interpolação entre locais medidos para a construção de mapas de isolinhas, será preciso utilizar uma ferramenta mais adequada para medir a dependência espacial: o semivariograma.

2.2.2.2. O semivariograma

O semivariograma é um modelo gráfico (Fig. 1) que indica a relação espacial entre valores medidos e, segundo Delhomme¹ (citado por Vieira et al., 1983), por definição, é:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (11)$$

O estimador do semivariograma utilizado é o proposto por Matheron (1971):

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (12)$$

onde, E é o valor esperado ou esperança, $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ separados pela distância h ; $Z(x_i)$ é a variável regionalizada associada ao

¹ Delhomme, J.P. Kriging in hydrosiences, Centre d'informatique geologique, Fontainebleau, France, 1976.

ponto x e $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)$ são os valores medidos nos locais $x_1, x_2, \dots, x_n$. O gráfico de $\gamma^*(h)$ versus os valores correspondentes de h , chamado de semivariograma é uma função do vetor h e, portanto, depende de ambos, magnitude e direção de h .

Segundo Mallants (1996), C_s é o componente estrutural; C_0 é o efeito pepita ou “nugget”, que representa a estrutura em pequena escala que ocorre para distâncias menores do que os intervalos de amostragem, à micro heterogeneidade e ao erro experimental; $C_0 + C_s$ é a variância total ou “Sill” e a o alcance ou “range”. Quando o gráfico de semivariograma é idêntico para qualquer direção de h , ele é chamado de isotrópico e representa uma situação bem mais simples do que quando é anisotrópico. De qualquer maneira, a eq. 12 é usada para o cálculo do semivariograma sob isotropia ou não (Vieira, 1997).

Figura 1. Esquema do semivariograma.

Conhecendo o semivariograma $[\gamma(h)$ versus $h]$ da variável, este mostrará uma série de pontos discretos de $\gamma(h)$ correspondendo a cada valor de h e para o qual, uma função contínua deve ser ajustada.

Vieira (1997) cita que o ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos aspectos mais importantes das aplicações da teoria das variáveis

regionalizadas, pois todos os cálculos de geoestatística dependem do valor do modelo do semivariograma para cada distância especificada. Ainda, o mesmo autor salienta que o método de tentativa e erro, aliado ao exame dos resultados, é suficiente para o ajuste das curvas e que não se deve dar importância excessiva a pequenas flutuações que podem ser artifícios referentes a um pequeno número de dados. Vauclin et al. (1983) acrescentam que a forma exata do semivariograma nunca é conhecida e que o modelo é apenas uma aproximação à função.

Havendo dependência espacial entre as amostras, ajustam-se diferentes modelos matemáticos com os quais podem-se gerar mapas de isolinhas ou de superfície tridimensional. Esses modelos pressupõem a existência de um valor inicial C_0 (o efeito pepita ou “nugget”), de um valor em torno do qual o semivariograma se estabiliza C (patamar ou “sill”), exceto no caso do modelo linear, e de um valor de distância h para o qual ocorre essa estabilização, a (domínio ou “range”).

Dependendo do comportamento de $\gamma(h)$ para altos valores de h , os modelos podem ser classificados em modelos com patamar (“Sill”) e modelos sem patamar. Os modelos mais comuns aplicados ao estudo das propriedades físicas do solo correspondem ao primeiro grupo e, basicamente, são o linear (eq. 13); o esférico (eq. 14); o exponencial (eq. 15) e o gaussiano (eq. 16).

a.) Modelo linear:

$$\begin{aligned}\gamma(h) &= C_0 + \beta h & 0 \leq h \leq a \\ \gamma(h) &= C_0 + C_s & h > a\end{aligned}\tag{13}$$

onde $\beta = \frac{C_s}{a}$ e corresponde ao coeficiente angular para $0 \leq h \leq a$. O patamar é determinado por inspeção; o coeficiente angular β é determinado pela inclinação da reta que passa pelos primeiros pontos de $\gamma(h)$, dando-se maior peso àqueles que correspondem ao maior número de pares; o efeito pepita, C_0 , é determinado pela interseção da reta no eixo $\gamma(h)$; o alcance, a , é o valor de h correspondente ao

cruzamento da reta inicial com o patamar e $C_s = \text{patamar} - C_0$ (Vieira et al., 1983; Mallants, 1996; Vieira, 1997)

b.) Modelo esférico:

$$\gamma(h) = C_0 + C_s \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 \leq h \leq a \quad (14)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_s \quad h > a$$

O modelo esférico é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita, C_0 , e do patamar, $C_0 + C_s$, e depois passando-se uma reta que intercepte o eixo y em C_0 e seja tangente aos primeiros pontos próximos de $h = 0$. Essa reta cruzará o patamar à distância $\alpha = \frac{2}{3}a$. Assim, o alcance a , será $a = \frac{3}{2}\alpha$. O modelo esférico é linear até aproximadamente $1/3a$ (Vieira et al., 1983).

c.) Modelo exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_s \left[1 - \exp\left(-3\frac{h}{a}\right) \right] \quad 0 \leq h < d \quad (15)$$

em que d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido. O parâmetro a é determinado visualmente como a distância após a qual o semivariograma se estabiliza e os parâmetros C_0 e C_s são determinados da mesma maneira que para o esférico (Vieira et al., 1983; Vieira, 1997).

O modelo exponencial atinge o patamar apenas assintoticamente, enquanto que o modelo esférico o atinge no valor do alcance (Vieira, 1997). Trangmar et al. (1985) acrescentam que o modelo exponencial é poucas vezes utilizado em estudos de solos pois, o alcance infinito é consequência de processos muito contínuos, que raramente ocorrem em solos agrícolas. Porém, McBratney e Webster (1986), mencionam que os modelos esférico e exponencial são os mais utilizados.

d.) Modelo gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_s \left[1 - \exp\left(\frac{-3h}{\alpha_0}\right)^2 \right] \quad 0 \leq h < d \quad (16)$$

em que $\alpha_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}a$, onde o alcance a é obtido visualmente à distância em que o semivariograma experimental se estabiliza (Vieira et al., 1983), e d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido.

Segundo Trangmar et al. (1985), a forma ideal do semivariograma é a do modelo esférico, pois tem-se um crescimento das semivariância com a distância entre pontos de amostragem até alcançar um valor mais ou menos constante.

2.2.2.3. A Krigagem

A krigagem é um processo de interpolação que estima valores de propriedades medidas em locais não amostrados, sem tendência e com variância mínima, podendo expressar os resultados em forma de mapas de isolinhas ou de superfície tridimensional (Borgelt, et al., 1994; Mallants, 1996; Vieira, 1997).

O valor da variável espacial num local não amostrado é estimado por combinação linear de valores medidos em outros locais, levando-se em conta o conhecimento espacial da variável, expressa pelo semivariograma e os locais dos valores conhecidos. Pontos perto dos locais não amostrados têm maior peso do que pontos afastados e pontos agrupados levam mais peso do que pontos isolados (Borgelt et al., 1994; Vieira, 1997). Supondo que $z(x_i, y_i)$ é uma propriedade do solo com as coordenadas espaciais x_i e y_i , o valor estimado por krigagem em locais não amostrados corresponde a:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (17)$$

em que $z^*(x_0, y_0)$ corresponde ao valor estimado no local não amostrado de coordenada x_0, y_0 ; λ_i é o peso da krigagem; $z(x_i, y_i)$ é o valor conhecido da amostra localizada no ponto x_i, y_i ; n corresponde ao número de vizinhos utilizados para a interpolação.

A avaliação da “krigagem” é realizada utilizando-se a metodologia conhecida como validação cruzada (“cross validation”) que consiste em estimar os valores da variável em estudo sobre os mesmos pontos amostrados e comparar os novos valores com os dados medidos (McBratney e Webster, 1986; Cressie, 1993).

2.3. Sensoriamento remoto

A obtenção de dados sobre o ambiente pode se dar de duas maneiras: “in situ” ou remotamente. Em 1960, é empregado pela primeira vez o termo Sensoriamento Remoto (Vettorazzi, 1992).

Crepani (1983) define o sensoriamento remoto como “a ciência e a arte de se obterem informações sobre um objeto, área ou fenômeno, através da análise de dados coletados por aparelhos denominados sensores, que não entram em contato direto com os alvos em estudo”.

Os dados em sensoriamento remoto podem ser adquiridos em diferentes níveis, de acordo com a distância entre o sensor e o objeto de interesse: terrestre (campo/laboratório), aéreo (balões, aviões, etc.) e orbital (espaçonaves, satélites artificiais e estações orbitais) (Mather, 1994).

Ao nível de laboratório, estuda-se o comportamento espectral dos alvos quase sem interferência dos fatores ambientais. Ao nível de aeronave, a energia registrada pelo sensor não se refere geralmente a um determinado objeto, mas a um arranjo de objetos da cena. Ao nível orbital, em cada elemento de resolução no terreno (correspondente a um “pixel” na imagem), a energia registrada é a integração da resposta de diferentes objetos (Novo, 1989).

Silva (1978), Hoffer (1978), Curran (1988), Price (1990) e Mather (1994) descreveram amplamente o comportamento espectral dos alvos naturais mais importantes em agricultura: solo, água e vegetação. No entanto, Novo (1989) menciona que existe

uma falta de informação sobre o comportamento espectral desses alvos para as condições tropicais.

Segundo Curran (1988), a energia eletromagnética é considerada como o espectro dos comprimentos de onda de 10^{-10} μm (raios cósmicos) até a 10^{10} μm (comprimentos de onda de rádio), sendo que em sensoriamento remoto é de maior interesse os comprimentos de onda do **espectro óptico**, faixa que vai de 0,30 μm a 15 μm .

A região entre 0,30 μm e 3,0 μm é chamada freqüentemente de **porção refletiva** do espectro eletromagnético. A energia desse comprimento de onda é basicamente originada do sol e refletida pelos alvos na superfície terrestre. Essa porção refletiva é ainda dividida em **visível** e **infravermelho refletivo**, sendo que os olhos humanos respondem à radiação entre os comprimentos de onda de 0,38 μm a 0,72 μm (faixa do visível). A região entre 0,72 μm e 3,0 μm é o infravermelho refletivo, o qual ainda é subdividido em **infravermelho próximo** (0,72 μm a 1,30 μm) e **infravermelho médio** (1,30 μm a 3,00 μm) (Curran, 1988 e Silva, 1978).

Na região do visível do espectro electromagnético, a resposta espectral das folhas é influenciada, principalmente, pelos pigmentos existentes nos cloroplastos encontrados em quantidade nas células do mesófilo foliar. A alta porcentagem de radiação refletida pela folha na região do infravermelho próximo é causada essencialmente pela estrutura celular. Graficamente, pode-se observar na Fig. 2 o comportamento da resposta espectral de uma folha típica.

Figura 2. Curva de resposta espectral de uma folha típica.

Na Fig. 2, observa-se que a vegetação reflete muito mais a energia na parte do infravermelho próximo do espectro electromagnético, o que é de grande importância em sensoriamento remoto (Denison, 1996; Greer, 1990).

Dado que os olhos humanos têm sensibilidade apenas aos comprimentos de onda do visível, a vegetação aparece verde porque as plantas absorvem mais a luz vermelha e a azul do que a verde. Porém, na porção do visível, as plantas refletem apenas uma pequena porcentagem desta luz verde incidente. Essa baixa reflectância aos olhos humanos permite enxergar apenas ligeiras diferenças nos tons de verde nas plantas, isto é, pequenas mudanças na luz verde refletida nem sempre significam variações significativas na aparência do alvo (Greer, 1990).

Existem ao longo de todo o espectro eletromagnético, regiões chamadas **janelas atmosféricas** (Tabela 1), onde a absorção atmosférica é relativamente pequena e que se caracterizam por uma boa transmitância à radiação eletromagnética. Conseqüentemente, são essas regiões onde praticamente todas as atividades em sensoriamento remoto podem ser realizadas com maior facilidade (Silva, 1978; Mather, 1994).

Moran (1994) menciona que a agricultura é a grande beneficiária da tecnologia do sensoriamento remoto, porém ainda não se explora muito o potencial dos dados de sensores remotos para o manejo da irrigação.

Tabela 1. Principais janelas atmosféricas por região do espectro eletromagnético.

Região do espectro eletromagnético	Janela atmosférica
Ultravioleta e visível	0,30 μm -0,75 μm
Infravermelho próximo	0,77 μm -0,91 μm
	1,00 μm -1,12 μm
	1,19 μm -1,34 μm
Infravermelho médio	1,55 μm -1,75 μm
	2,05 μm -2,40 μm
Infravermelho termal	8,00 μm -9,20 μm
	10,20 μm -10,40 μm
Microondas	2,06 mm-2,22 mm
	3,00 mm-3,75 mm
	7,50 mm-11,50 mm
	20,00 mm-+

Fonte: Adaptado de Silva, F.L., 1978.

2.3.1. Fotografias convencionais e digitais

As imagens eletrônicas digitais envolvem um arranjo de “pixels” discretos, tendo cada “pixel” um número digital (nível de cinza) que representa o seu brilho em cada banda espectral. Os dados da imagem digital são lidos, processados, manuseados e armazenados utilizando-se computadores. Sendo esse um processo fotográfico não convencional (pois, as imagens não são geradas diretamente em um filme fotográfico), freqüentemente é chamado de fotografia digital (Lillesand e Kiefer, 1994).

Khosla (1992) menciona que a fotografia convencional permite apenas uma interação limitada com uma imagem depois de ser capturada mas que, com a introdução da imagem eletrônica pode-se ter acesso a milhões de “bits” de informação.

As câmaras aéreas cartográficas continuam tendo um papel importante na obtenção de produtos de qualidade para trabalhos de fotografia aérea. Do lado digital, estão se consolidando os varredores eletro-ópticos e os sensores digitais CCD (“charge coupled devices”), em arranjos lineares e de área com qualidade na sua resolução. Se as técnicas de fotogrametria digital chegam a ser aplicadas, as imagens de filmes deverão ser digitalizadas em equipamentos que possam ler os elementos de cores (“pixels”) e armazenar as informações (Light, 1996).

Quadro 1. Comparação entre filmes fotográficos e imagens eletrônicas

Características	Processo fotográfico	Processo eletrônico de imagens
Captura de dados	Filme na câmara	Dispositivo fotossensível (CCD).
Armazenamento de dados	Filmes ou impressões	Meio magnético, computadores.
Manuseio de dados	Revelação química ou impressão óptica	Processamento digital das imagens.
Transmissão de dados	Correio, fax.	Telemetria, telefone, rede de computadores.
Apresentação	Slides ou filmes	Tela de computador, TV, vídeo
Impressão	Filmes	Impressoras.

Fonte: Lillesand e Kiefer (1994).

Embora os filmes fotográficos aéreos estejam sendo gradualmente substituídos pelo uso das imagens aéreas digitais, o processo de digitalização via “scanner” desses filmes é uma tecnologia ideal no processo de transição (Light, 1996). No Quadro 1

mostram-se algumas características dos filmes fotográficos em relação às imagens digitais.

Levrault e Puech (1993) resumem como principais vantagens de se trabalhar com imagens, o caráter não destrutivo, a rapidez das medidas e a aquisição sinóptica de dados que permite uma descrição exaustiva da superfície em estudo.

Tueller et al. (1988) utilizaram fotografias aéreas convencionais e infravermelho com câmara fotográfica 35mm para monitorar as mudanças na resposta espectral de uma cobertura vegetal, concluindo que, essas mudanças foram mais evidentes em espécies arbustivas do que em espécies de menor porte para as fotografias convencionais. O filme infravermelho colorido teve sempre mais vantagens do que o convencional.

O monitoramento da agricultura e o manejo da irrigação através de fotografias e imagens ao nível de aeronave vem sendo utilizado em trabalhos realizados por diferentes pesquisadores, colocando como principais vantagens em relação ao nível orbital a resolução espacial e a aquisição em tempo quase real (Tueller, 1988; Pearson et al., 1994; Moran, 1994).

Levrault e Puech (1993) estudaram através de imagens aéreas digitais na banda do infravermelho a variabilidade intraparcelar na cultura de soja diversamente irrigada, determinando a heterogeneidade da cobertura vegetal. Os resultados também permitiram a melhor compreensão da variabilidade espaço-temporal da alimentação hídrica da cultura.

Pearson et al. (1994) realizaram uma pesquisa em culturas irrigadas por aspersão pivô central utilizando imagens aéreas em diferentes culturas, com o objetivo de identificar problemas em áreas agrícolas. Identificaram estresse provocado por geadas, problemas de irrigação e de doenças. Os autores tiveram problemas com o equipamento e reconhecem a necessidade de tecnologia de alta qualidade para se pensar no sensoriamento remoto como ferramenta de ajuda na agricultura.

Lantieri (1995), combinando imagens do satélite SPOT e fotografia aérea convencional, fez inventários de uso da terra para o planejamento de atividades relacionadas com agricultura irrigada, recomendando a utilização de fotografia aérea para o monitoramento da irrigação.

2.3.2. Utilização de semivariogramas em imagens digitais

Visto que os dados de sensoriamento remoto residem principalmente em imagens, um importante componente de informação é adicionado às saídas do sensor: a posição espacial. Então, a posição de medida na imagem é usualmente uma função quantificável da posição na cena do elemento de resolução na unidade da qual é derivada. Cada medida pode ser associada a uma localização no terreno e posicionada em relação às outras medidas. Isso significa que a posição do sensor torna-se uma variável regionalizada, já que sua posição no espaço é conhecida (Woodcock et al., 1988a).

A utilidade da informação espacial extraída de imagens digitais tem limitações devido ao desconhecimento existente da natureza e causas das variações observadas nessas imagens, sendo essa a principal razão de não se utilizar a teoria das variáveis regionalizadas em sensoriamento remoto. Woodcock et al. (1988a e 1988b), estudaram a utilização de variogramas em sensoriamento remoto objetivando encontrar algumas dessas causas que originam as limitações citadas anteriormente. Menciona-se que as fontes de erro têm origem nas cenas de interesse e nos equipamentos utilizados. Os autores concluem que a utilização de semivariogramas em imagens digitais permitiu entender a natureza e as causas dessa variabilidade espacial.

Ainda Woodcock et al. (1988b) aplicaram a teoria das variáveis regionalizadas em imagens obtidas sob diferentes condições de atividade agrícola e florestal. Nas imagens obtidas de uma cultura de milho, simularam pela técnica de krigagem a imagem estudada, determinando-se na imagem simulada algumas características do terreno.

Webster et al. (1989) utilizaram a teoria das variáveis regionalizadas para conhecer a dependência espacial da radiação e fazer mapas de distribuição espacial, em nível regional, através de imagens aéreas multiespectrais na faixa do infravermelho. A pesquisa teve como um dos principais obstáculos o tamanho do alvo de interesse de onde era extraída a radiação, fato também encontrado por Woodcock et al. (1988a e 1988b).

Cohen et al. (1990) utilizaram semivariogramas para extrair informações de imagens digitais obtidas numa área de coníferas, com o objetivo de encontrar diferenças na estrutura do dossel, bem como a potencialidade da utilização de semivariogramas em

imagens pancromáticas dos satélites Spot e Landsat/TM. Utilizaram “pixels” de 1m, 10m e 30m. Os semivariogramas baseados nas distâncias de 10m e 30m apresentaram uma quantidade menor de informação em relação aos semivariogramas de 1m, sendo que, esses últimos, permitiram conhecer a estrutura espacial do dossel das coníferas na área estudada.

Chavez (1992), estudando imagens nas faixas do infravermelho e do visível, encontrou maior variabilidade nas imagens infravermelhas quando comparadas com as imagens no visível.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área de estudo

O ensaio foi conduzido na área experimental do Departamento de Agricultura da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ/USP, em Piracicaba (SP), cujas coordenadas geográficas são: 22°42'30" S, 47°38'00" W e 540m de altitude.

O solo é classificado como Terra Roxa Estruturada Eutrófica, horizonte A moderado, textura argilosa a muita argilosa (Kandiudalfic Eutrudox na classificação americana).

Segundo a classificação de Köppen (1948), o clima da região é Cwa, especificado como subtropical com chuvas no verão e inverno seco. A temperatura média é de 21,2°C e a precipitação média anual é em torno de 1247mm.

Utilizou-se o sistema de irrigação por aspersão do tipo pivô central (avaliação em Apêndice 1), cujo equipamento abrange uma área de 3,30 ha de superfície (2,50 ha foram utilizados para o experimento). As irrigações foram feitas utilizando-se uma única lâmina de aplicação (temporizador regulado a 10%) equivalente a 18mm para a área experimental. A área sob o pivô central apresenta declividade média de 3% (Fig. 3).

3.2. A cultura

Utilizou-se a cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L., var. pérola, tipo indeterminado 2/3, EMBRAPA SPSB), que cobre rapidamente a superfície do solo. A semente foi tratada com Vitavax+Thiran (250 ml/100kg de semente) e molibdato de sódio (100g/100kg de semente) e a semeadura foi realizada em 26 de março de 1997.

Foi feita adubação na semeadura a razão de 300 kg/ha de MAP (52% P), 30 dias após a semeadura (DAS) aplicou-se a lanço 250 kg/ha de FOSMAG 510 M4 (18% P, 18% CaO), 100 kg/ha de KCl (62% $K_2O \cong 51 K$) e 30 kg/ha de micronutrientes (BR 12) e nitrogênio (N) em cobertura.

O desenvolvimento da cultura foi acompanhado diariamente e o rendimento foi determinado em áreas identificadas pela análise da variabilidade espacial da granulometria e do potencial mátrico.

Figura 3. Relevo da área experimental.

3.3. Atributos do solo

3.3.1. Granulometria do solo

Por ocasião da semeadura, foram coletadas 188 amostras de solo para análise granulométrica. A profundidade de coleta foi de 0,20m, à distância de 0,20m de cada ponto tensiométrico previamente localizado.

No laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, as amostras de solo foram secadas à sombra, peneiradas e logo determinou-se os conteúdos de argila, silte e areia pelo método do densímetro. Os resultados obtidos são apresentados no Anexo I.

3.3.2. Potencial mátrico da água no solo

Foram montados no laboratório de Física de Solos do Departamento de Engenharia Rural 188 tensiômetros de transdutor de pressão. A condutância hidráulica e a pressão de borbulhamento das cápsulas porosas dos tensiômetros foram avaliadas conforme metodologia apresentada por Libardi (1996). O resultado das avaliações são apresentados em Apêndice 2.

A escorva dos tensiômetros foi realizada antes de cada irrigação e a leitura 24 a 32 horas depois de ter irrigado. Objetivando o menor tempo possível entre os vãos e a leitura dos tensiômetros, esses foram lidos aproximadamente às 16h do mesmo dia utilizando-se um tensímetro. As leituras dos tensiômetros apresentam-se em Anexo I.

3.4. Esquema experimental de amostragem

A instalação dos tensiômetros foi realizada a 0,20m de profundidade, a distâncias que variaram de 1,5m até 18,0m, segundo as linhas de semeadura e entre plantas. Os pontos tensiométricos foram referenciados num sistema local de eixos cartesianos. A

distribuição dos tensiômetros na área experimental resultou numa malha irregular de 188 pontos (Fig. 4).

A Fig. 4 esquematiza os pontos onde foi realizada a amostragem de solos para análise granulométrica.

Figura 4. Localização dos tensiômetros na área experimental.

3.5. Imagens aéreas

3.5.1. Obtenção de imagens aéreas

Foram instalados quatro pontos de controle no terreno para realizar as correções geométricas das imagens e realizadas quatro missões de vôo, aos 45, 52, 60 e 85 dias após o semeadura, respectivamente, em: 12/05/97, 21/05/97, 27/05/97 e 25/06/97. Entre as duas últimas datas, as condições climáticas limitaram o menor intervalo.

As imagens digitais na banda do infravermelho próximo foram obtidas com uma câmara 24mm digital (Quadro 2):

Quadro 2. Especificações básicas da Dycam ADC (Agricultural Digital Camera)

Característica	Especificações
Sensibilidade espectral	600 nm até 1100 nm, respectivamente vermelho e infravermelho próximo (bandas 3 e 4 estendidas do TM)
“Pixels”	496 x 365
Cores	24 bit
Interface	Porta serial RS-232
Armazenamento de imagens	8 a 24 (seleção do usuário), 36 a 100 (opção disponível)
Fonte de energia	Baterias recarregáveis Ni-Cad ou 12DC externo
Óptica	8,5 mm; F4,5; 1 m ao infinito no visor (foco)
Tempo de exposição	Automático: 1/2000 s até 2 s ou seleção do usuário
Acionamento	Botão na câmara ou através de um dispositivo remoto
Software	Aplicações em WINDOWS, permite a configuração da câmara, acesso e todas as operações de arquivo.
Índices de vegetação	NDVI, SAVI e PVI
Calibração	O usuário realiza a calibração de rotina em uma amostra de imagem feita sob condições ambiente.
Tipos de arquivo	.BMP, .TIF, .JPG, Targa etc.
Tamanho	17 cm x 8 cm x 3 cm (6,7” x 3,2” x 1,2”)
Massa	283,50 g (10 oz).

As fotografias aéreas convencionais foram obtidas com uma câmara 35mm (Minolta Maxxum 300si), filme colorido convencional. As missões de vôo foram realizadas em dias claros e sem vento, utilizando-se um avião monomotor Neiva P-56C (“Paulistinha”), entre 13h e 14h e a uma altura aproximada de 350 m. Paralelamente a cada missão de vôo, foram realizadas leituras dos tensiômetros.

3.5.2. Tratamento das imagens aéreas

As fotografias aéreas convencionais foram transformadas ao formato digital utilizando-se um “scanner” HP ScanJet-4c. Após, utilizou-se o “software” IDRISI (Eastman, 1995), para fazer as correções geométricas pelo método dos vizinhos mais próximos, bem como a classificação digital. Foi utilizado o método de classificação não supervisionada, através da análise de agrupamentos, “Cluster” (Phillips & Swain 1978; Richards, 1993).

Logo após várias tentativas variando o número de grupos, a análise foi realizada com três agrupamentos para cada imagem tratada. Assume-se que a homogeneidade no valor dos “pixels” limitou a utilização de um número maior de grupos.

Para as imagens obtidas com ambas as câmaras, foi extraído o valor digital dos “pixels”, correspondentes aos pontos tensiométricos no campo, através do seguinte procedimento: i) editou-se um arquivo com as coordenadas x e y de todos os tensiômetros, com a estrutura de um arquivo vetorial de pontos do Idrisi; ii) foi criada, a partir do arquivo anterior, uma imagem com resolução espacial de 0,50m x 0,50m (a distância mínima entre tensiômetros é de aproximadamente 1,5m); iii) fez-se uma reclassificação da imagem, definindo-se valores de 0 (zero) para os “pixels” sem tensiômetro e 1 (um) para os pontos tensiométricos, tendo como resultado uma imagem booleana² (máscara); iv) os valores digitais dos “pixels” de interesse foram obtidos pelo produto da imagem original, corrigida geometricamente, pela imagem booleana; v) da imagem final foram extraídos os valores de interesse (coordenada z) de cada ponto tensiométrico.

Não foi observada a existência de uma relação entre as imagens e os mapas de atributos do solo gerados por krigagem. Também, checkou-se a existência de uma relação linear entre as variáveis anteriormente citadas, por meio da análise de regressão. Finalmente, verificou-se a dependência espacial do valor digital dos “pixels” através de semivariogramas, ajustando-se modelos aos semivariogramas correspondentes.

² Imagem booleana: imagem cujos atributos em qualquer célula têm apenas valores 1 ou 0. Também, pode ser chamada de imagem binária ou imagem lógica (Eastman, J.R., 1995).

3.6. Análises estatísticas

3.6.1. Análises descritivas

Realizou-se a um resumo estatístico (medidas de posição e de dispersão) e análise exploratória dos dados utilizando o “software” Statgraphics (1993), conforme às metodologias descritas por Emerson & Hoaglin (1983), Hoaglin (1983), Emerson & Strenio (1983) e Alves (1987).

Hoaglin (1983) menciona que para examinar os dados com o objetivo de distinguir observações estranhas (“Outliers”), é necessária uma medida de dispersão que seja insensível a essas observações o que, contrariamente à amplitude e ao desvio padrão amostrais, a dispersão dos quartos fornece. Isto é, a dispersão dos quartos dá mais relevo a porção central dos dados do que aos extremos.

Então, quando os dados apresentaram possíveis valores periféricos, utilizou-se o critério da dispersão dos quartos (dF) para definir as barreiras de “outliers”. Segundo Hoaglin (1983) e Emerson & Strenio (1983), os valores dos quartos e da dispersão dos quartos estão muito próximos dos quartis e da amplitude interquartil. Portanto, se a altura dos quartos F (“fourth” em inglês) corresponde a:

$$F = \frac{[Md] + 1}{2} \quad (18)$$

onde Md é a posição da mediana $[(n+1)/2]$, sendo n o número de dados utilizados; os colchetes representam o maior inteiro [ex: no trabalho, $(188+1)/2 = 94,5 = 95$]. A dispersão dos quartos (dF) corresponde a:

$$dF = FS - FI \quad (19)$$

em que FS é o quarto superior e FI o quarto inferior. Os limites dos dados periféricos foram definidos através da relação quartil (dF) a seguir:

$$\left(FI - \frac{3}{2}dF\right) \geq V \leq \left(FS + \frac{3}{2}dF\right) \quad (20)$$

em que V corresponde ao valor da variável de interesse. Esquematicamente:

Figura 5. Esquema do critério utilizado para definir a barreira de dados periféricos ou “outliers”. (Adaptado de Hoaglin, 1983).

Emerson & Strenio (1983), mencionam que a utilização do valor 3/2 é de certa forma arbitrária, mas que tem se mostrado, com variadas coleções de dados, utilizável para a identificação dos valores que requerem atenção especial.

3.6.2. Aplicação da teoria das variáveis regionalizadas

A dependência espacial dos atributos do solo (argila, silte, areia e potencial mátrico) e dos valores dos “pixels” nas imagens, é descrita a partir de semivariogramas, utilizando-se o “software” Variowin (Panatier, 1996), para o ajuste dos modelos aos semivariogramas experimentais.

Nos atributos do solo que apresentaram dependência espacial, foram realizadas interpolações pela técnica da krigagem a distâncias de 1,5m, gerando-se mapas de isolinhas e de superfície tridimensional.

Como o semivariograma é geral e a krigagem local, para a área em estudo, no caso de variáveis que apresentaram valores discrepantes, os semivariogramas foram gerados após retirada desses valores, utilizando-se esse mesmo conjunto de dados para

fazer a validação cruzada e, a krigagem foi feita considerando-se todos os valores obtidos. Em outras palavras, como o valor periférico existe e influencia os resultados na região onde ele está, esse valor volta na krigagem.

Os estimadores estatísticos das interpolações feitas pelo método da krigagem foram avaliados fazendo-se a validação cruzada dos modelos ajustados aos semivariogramas. Essa validação foi realizada com o “software” Geoeas (Englund & Sparks, 1991) e os mapas finais da interpolação foram gerados alimentando o módulo de krigagem do “software” Surfer (Keckler, 1995) com os dados dos modelos ajustados aos semivariogramas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a execução do experimento, ocorreram várias chuvas que definiram uma maior intensidade de aplicação de irrigação no final de abril e nas primeiras três semanas de maio.

Na Fig. 6 estão representadas a distribuição da chuva, as épocas de irrigação, as missões de vôo (M1...M4) e as leituras dos tensiômetros durante o ciclo da cultura. Deve-se observar que a irrigação, além de maximizar o rendimento da cultura, teve o objetivo de uniformizar a umidade na área experimental, de modo que as variações de potencial mátrico fossem devido, principalmente, aos atributos físicos do solo.

Figura 6. Distribuição da chuva no período em que foi realizado o experimento. As setas pequenas fazem referência às irrigações realizadas e as setas maiores às missões de vôo e leitura dos tensiômetros.

4.1. Análise descritiva

4.1.1. Granulometria

Os valores medidos do conteúdo de argila, silte e areia estão apresentados no Anexo I e as estatísticas para esses atributos são apresentadas na Tabela 2.

Observa-se na Tabela 2 que as medidas de tendência central (média, mediana, moda e média geométrica), são semelhantes para os três componentes da textura. A maior diferença ocorreu na moda do conteúdo de areia. A semelhança dessas medidas indica que os três atributos apresentam distribuição normal. Na mesma tabela observa-se que as medidas de dispersão (desvio padrão, amplitude e coeficiente de variação) apresentaram valores baixos.

Tabela 2. Resumo estatístico da granulometria da área experimental.

Estatística	Argila	Silte	Areia
Tamanho da amostra	188	188	188
Média	47,79	17,57	34,62
Mediana	47,03	17,47	35,93
Moda	47,60	16,11	29,76
Média Geométrica	47,49	17,32	34,32
Desvio Padrão	5,44	3,04	4,47
Mínimo	35,36	11,58	25,28
Máximo	59,70	33,26	44,50
Quartil Inferior	43,94	15,40	30,66
Quartil Superior	51,75	18,90	37,97
Assimetria	0,288	1,01	-0,32
Curtose	-0,62	3,09	-0,95
CV(%)	11,39	17,30	12,91

O diagrama de ramos e folhas (Fig. 7) mostra que apenas o conteúdo de silte apresentou (Fig. 7b) dados candidatos a “outliers” (dados periféricos). Deve-se ressaltar que o conteúdo de silte foi obtido por diferença e não por medição direta, o que poderia ser a causa desses dados. Além disso, observa-se também uma tendência à normalidade na forma dos diagramas.

Na Fig. 9 pode-se observar a tendência à normalidade dos valores de argila, silte e areia, justificada pela proximidade da distribuição dos dados à linha reta. Pode-se observar também que os valores do conteúdo de areia apresentam maior dispersão em relação aos outros atributos.

Figura 9. Gráfico de probabilidade normal e reta de Henry para (a) argila, (b) silte e (c) areia.

4.1.2. Potencial mátrico

Processo semelhante foi utilizado para o potencial mátrico na análise estatística e de aplicação da teoria das variáveis regionalizadas. Porém, a situação é bastante diferente, pois, além dos erros associados ao aparelho, esse parâmetro é bastante heterogêneo nas suas medidas, como tem sido mostrado por Hamlett et al. (1986) e Dourado-Neto (1989). Os valores do potencial mátrico lidos no campo podem ser vistos no Anexo I.

Por outro lado, têm-se também as diferenças quanto à distribuição da água pelo equipamento pivô central e o consumo de água, variável, pela cultura ao longo de seu ciclo (Rezende, 1993; Doorembo & Kassan, 1995).

Ainda, sabe-se que a disponibilidade de água no solo é influenciada pelo tamanho e distribuição espacial das partículas (Libardi, 1995; Reichardt, 1996; Vieira et al., 1983; Vieira, 1981).

Percebe-se, então, a dificuldade na medição do potencial mátrico, pois as variações temporais de água no solo, devidas principalmente ao crescimento da cultura, e, as variações espaciais devidas à granulometria do solo, à distribuição da água pelo equipamento de irrigação e ao próprio aparelho tensiométrico, são praticamente fixas.

No caso do crescimento da cultura, assumiu-se que a irrigação de alta frequência garantiu a umidade necessária para a planta. Os baixos valores (em termos absolutos) na leitura dos tensiômetros confirmam esse fato (Anexo I). A distribuição de água é um problema inerente ao equipamento e, no caso do tensiômetro, foram feitos os testes necessários no laboratório para garantir a qualidade da informação.

O primeiro passo, o resultado do resumo estatístico para as diferentes épocas de leitura dos tensiômetros, é mostrado na tabela a seguir. Observa-se na Tabela 3 as diferenças entre as medidas de tendência central e entre as medidas de dispersão, o que é mais evidente nas duas primeiras datas de leitura.

Tabela 3. Resumo estatístico do potencial mátrico (ψ_m , kPa) após irrigação, nas diferentes datas de leitura dos tensiômetros.

Estatísticas	12/05/97¹	21/05/97²	27/05/97³	25/06/97⁴
Tamanho da amostra	188	188	188	188
Média	16,698	31,807	8,204	10,004
Mediana	10,850	23,150	8,050	9,2
Moda	6,8	11,0	7,0	8,5
Média Geométrica	12,909	25,387	8,059	9,582
Desvio Padrão	160,87	217,46	15,94	34,35
Mínimo	5,4	8,1	5,3	5,9
Máximo	86,4	83,6	15,0	36,0
Quartil Inferior	8,050	14,4	7,0	8,0
Quartil Superior	17,3	48,2	9,2	11,1
Assimetria	2,87	0,89	0,83	3,13
Curtose	8,62	-0,55	1,04	17,79
CV(%)	96,34	68,36	19,43	34,34

¹ = 45 DAS; ² = 52 DAS; ³ = 60 DAS; ⁴ = 85 DAS

Os diagramas de ramos e folhas, apresentados na Fig. 10, mostram a não normalidade dos dados, além de apresentar os possíveis “outliers” (linha de dados no final do diagrama), para as leituras feitas em 12/05/97 (Fig. 10a), 27/05/97 (Fig. 10c) e 25/06/97 (Fig. 10d).

A assimetria mostrada nas quatro datas de leitura pode se dever tanto à heterogeneidade nas cápsulas porosas dos tensiômetros quanto à distribuição da água pelo equipamento pivô central, como resposta ao consumo de água pela cultura ao longo do seu ciclo. Além dos testes necessários feitos em laboratório, no caso dos tensiômetros, e da avaliação do sistema de irrigação, o presente trabalho não quantificou esses possíveis erros.

Os “box-plot” para o potencial mátrico nas diferentes épocas de leitura são apresentados na Fig. 11. Observa-se a distribuição dos dados e a posição dos valores considerados candidatos a “outliers”, em relação às medidas de tendência central: mediana e média.

Pode-se observar no “box-plot” da Fig. 11a que não aparece a média, devido ao fato de que esta medida foi muito influenciada pelos valores extremos desse dia e deve estar representada fora da caixa e do alcance (linha horizontal) para os valores considerados como não periféricos.

A Fig. 12 mostra através da reta de Henry a dispersão dos dados de potencial mátrico, principalmente nas duas primeiras épocas de leitura.

Para contornar esta situação, definiu-se as barreiras para dados periféricos utilizando a definição dispersão dos quartos (dF) conforme descrito na metodologia.

Para o resultado obtido, foi feita a mesma análise estatística dos dados anteriores e o resumo estatístico é apresentado na Tabela 6. Os valores definidos como periféricos por esta metodologia foram, em sua maioria, de tensiômetros localizados no final do raio pivô.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 11 Gráfico “box-plot” do potencial mátrico em (a) 12/05/97, (b) 21/05/97, (c) 27/05/97 e (d) 25/06/97.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 12. Gráfico de probabilidade normal e reta de Henry do potencial mátrico em: (a) 12/05, (b) 21/05, (c) 27/05 e (d) 25/06.

Observa-se, na Tabela 4, que as maiores variações quanto aos resultados das estatísticas foram para a leitura do potencial mátrico em 12/05/97, principalmente com relação às medidas de dispersão, o que confirma o fato da influência dos valores extremos, embora a tendência tenha se mantido.

Tabela 4. Resumo estatístico do potencial mátrico (ψ_m , kPa) após irrigação e após retirada dos dados considerado periféricos.

Estatísticas	12/05/97	27/05/97	25/06/97
Tamanho da amostra	169	187	178
Média	12,116	8,168	9,419
Mediana	10,1	8,0	9,1
Moda	6,8	7,0	8,5
Média Geométrica	10,986	8,033	9,197
Desvio Padrão	58,63	15,18	20,90
Mínimo	5,4	5,3	5,9
Máximo	31,0	12,2	15,6
Quartil Inferior	7,8	7,0	8,0
Quartil Superior	14,1	9,2	10,8
Simetria	1,36	0,55	0,60
Curtose	1,27	-0,22	-0,06
CV(%)	48,39	18,59	22,19

4.2. Análise geoestatística

4.2.1. Granulometria

Na Fig. 13 estão apresentados os semivariogramas com os respectivos modelos ajustados para argila e areia. O conteúdo de silte mostrou-se sem estrutura espacial ou seja, não houve dependência espacial, o que pode ser atribuído ao fato dessa variável não ser medida mas, determinada por diferença.

Observa-se na Fig. 13 que o alcance (“range”) do conteúdo de argila e areia são próximos. Resultados semelhantes foram encontrados por Vauclin et al. (1983). O efeito devido a microvariações e outros fatores (efeito pepita), foi baixo em ambos os atributos.

Figura 13. Variogramas para (a) argila e (b) areia.

Os parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas de argila e areia (Fig. 13) são apresentados na Tabela 5.

Com os modelos ajustados aos variogramas, foram criados mapas de distribuição espacial pela técnica de “krigagem”, a qual gerou dados em pontos não amostrados. Os resultados são apresentados nas Figs. 14 e 15.

Pode-se observar que a krigagem expressou adequadamente as características da área experimental pois, estão definidas as linhas dos terraços, o que provavelmente influenciou na distribuição espacial dos atributos do solo. Observa-se que a área experimental é diferenciada em subáreas texturais.

A parte central da área estudada parece ser mais homogênea em termos de granulometria, o que pode ser observado nas Figs. 14 e 15. No campo, foi observado menor vigor das plantas nas áreas imediatamente depois dos terraços, bem como coloração amarela nas folhas.

Foi realizada a avaliação dos modelos ajustados aos semivariogramas e do número de vizinhos para a krigagem, utilizando a metodologia conhecida como validação cruzada, conforme McBratney e Webster (1986) e Cressie (1993). O resultado é apresentado no Anexo II.

As maiores diferenças na “krigagem” foram na estimativa dos dados extremos. No entanto, os valores da média e do desvio padrão do desvio reduzido próximos de zero e um (1), respectivamente, confirmam a boa qualidade da interpolação (Vieira et al., 1983) ou seja, a boa qualidade do ajuste dos modelos aos semivariogramas.

Figura 14. Distribuição espacial do conteúdo de argila no solo da área experimental.

Figura 15. Distribuição espacial do conteúdo de areia no solo da área experimental.

4.2.2. Potencial mátrico

Após ter retirado os valores considerados “outliers”, procedeu-se à determinação da dependência espacial do potencial mátrico para cada época de leitura. A Fig. 16, mostra os semivariogramas encontrados e os parâmetros dos modelos ajustados, são apresentados na Tabela 5.

Figura 16. Semivariogramas para o potencial mátrico (kPa) em (a) 12/05/97, (b) 21/05/97, (c) 27/05/97 e (d) 25/06/97.

Tabela 5. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas para os atributos do solo.

Parâmetro	Modelo	C_0^1	C_s^2	a^3
Argila	Esférico	5,80	21,80	27,57
Areia	Esférico	4,80	14,40	26,80
12/05/97 ⁴	Exponencial	2,450	22,400	2,205
21/05/97 ⁴	Exponencial	10,080	24,720	2,000
27/05/97 ⁴	Exponencial	5,009	11,960	2,025
25/06/97 ⁴	Esférico	22,639	25,599	2,280

¹. Efeito pepita ("nugget"); ². Patamar ("Sill"); ³. Alcance ("Range"); ⁴. Data de leitura do potencial mátrico.

Pode-se observar, pela Tabela 5, que o modelo exponencial foi o modal para os dados de potencial mátrico porém, o alcance é semelhante para as quatro datas de leitura dos tensiômetros.

Segundo Trangmar et al. (1985), o modelo exponencial é raramente utilizado em atributos relativos ao solo, pois o alcance infinito é significado de processos muito contínuos. Já McBratney e Webster (1986) mencionam que os modelos esférico e exponencial são os mais utilizados.

Dourado-Neto (1989), estudando a variabilidade espacial da solução do solo, além de outros modelos, ajustou o modelo exponencial a dados de potencial mátrico.

Observa-se pela Fig. 17 que a distribuição espacial do potencial mátrico em 12/05/97 foi fortemente influenciada pela distribuição da água do equipamento pivô central. No final do raio pivô, a tendência do potencial é ser menor, mas situação semelhante acontece na área mais argilosa (ver Fig. 14) do terreno. Não se considerando a área influenciada pela distribuição da água do equipamento pivô central, têm-se duas subáreas que são mais coincidentes com a distribuição espacial do conteúdo de argila (ver Fig. 14).

A tendência crescente em termos absolutos do potencial da água no solo pode ser considerada também como um exemplo da distribuição da água pelo equipamento pivô central (ver resultados da avaliação do sistema de irrigação e os valores medidos do potencial mátrico no Apêndice 1 e Anexo I, respectivamente).

Por outro lado, observa-se também nas Figs. 17, 18, 19 e 20 que essa influência do final do raio pivô no valor do potencial mátrico, é uma clara identificação do porquê do comportamento diferente dos dados que foram considerados periféricos.

Ainda, de acordo com Hoaglin (1983), essa diferença é explicada pela forma como os tensiômetros se comportaram no resto da área sob o pivô central.

Não considerando a distribuição da água de irrigação pelo equipamento pivô central, observa-se, pela Fig. 17 que, aos 45 DAS, a área experimental foi homogênea em termos de potencial mátrico.

Figura 17. Variabilidade espacial do potencial mátrico em 12/05/97 (45 DAS).

A Fig. 18 é mais ilustrativa em termos de retenção de água pelo solo em função da distribuição espacial da granulometria. Observa-se nessa figura que, a área que apresenta menor potencial mátrico (em termos absolutos), corresponde à área mais argilosa do terreno (ver Fig. 14) e, o maior potencial mátrico (em termos absolutos), a área com maior conteúdo de areia (ver Fig. 15).

Figura 18. Variabilidade espacial do potencial mátrico em 21/05/97 (52 DAS).

Ainda, pela Fig. 19 pode-se observar a tendência de maior umidade (menor potencial mátrico) na área com maior conteúdo de argila, bem como variações do potencial devido ao relevo da área experimental, observando-se a influência dos terraços na distribuição da água no solo.

Figura 19. Variabilidade espacial do potencial mátrico em 27/05/97 (60 DAS).

A distribuição espacial do potencial mátrico observado pela Fig. 20, apresenta padrão diferente em relação às Figs. 17, 18 e 19. A leitura dos tensiômetros foi realizada depois de um longo período chuvoso (ver Fig. 6) e, a cultura estava no final do seu ciclo. Então, o relevo do terreno (ver Fig. 3), influenciando o escoamento superficial na direção do final do raio molhado, bem como o consumo menor de água pela cultura (final do ciclo), podem ser as explicações ao fato de se ter potenciais mátricos maiores nessa área.

Figura 20. Variabilidade espacial do potencial mátrico em 25/06/97 (85 DAS).

4.3. Imagens aéreas

4.3.1. Análise digital

Os resultados da análise digital das imagens obtidas com a câmara Minolta são apresentados a seguir mas, é importante salientar que, as variações nos tons da cor verde da cultura foram baixas praticamente na totalidade da área experimental. Algumas diferenças foram detectadas, porém o tratamento digital realizado não chegou a definir

com clareza áreas diferenciadas em termos de resposta espectral, como no caso da distribuição espacial dos componentes granulométricos e do potencial mátrico.

Figura 21. Resultado da análise de agrupamento nas fotografias aéreas obtidas com a câmara Minolta em (a) 12/05/97, (b) 21/05/97, (c) 27/05/97 e (d) 25/06/97.

Dado que a análise “cluster” agrupa todos os “pixels” da área em classes espectrais homogêneas, o agrupamento deu como resultado várias classes que diluíram o alvo de interesse (área experimental). Para superar esta dificuldade, mascarou-se a área

fora do raio pivô e em seguida fez-se a análise de agrupamento apenas na área ocupada pela cultura (Figs. 21a, b, c e d)..

O tratamento digital da imagem, apresentada na Fig. 21, mostra que existe uma tendência a se ter ao menos duas áreas diferenciadas em termos de resposta espectral, o que é mais evidente na Figura 21b.

A Fig. 21 é o resultado das fotografias obtidas com a câmara convencional, convertidas ao formato digital utilizando o scanner HP ScanJet 4c. A classificação não supervisionada através da análise de agrupamento mostra uma mudança em termos de cor, à medida em que se vai no sentido de desenvolvimento da cultura. Essa tendência com o tempo não fica muito evidente na Fig. 21d pensando-se em termos de cultura.

A data em que foi realizada a última missão de vôo (Fig. 21d), corresponde praticamente à época de colheita e, nesse sentido, torna-se difícil assegurar que as mudanças expressas nessa imagem sejam produto da refletância da planta. Também, deve-se salientar que no tratamento digital realizado, utilizou-se a classificação não supervisionada, isto é, o classificador não condiciona a hierarquia dos agrupamentos e, já que a cultura estava perto de ser colhida, é provável que o agrupamento feito tenha considerado também o solo e não apenas o dossel, que era o alvo de interesse.

Observando a Fig. 21d, percebe-se que há uma semelhança com a Fig. 15 (areia). Devido à influência da distribuição da água pelo equipamento pivô central no potencial mátrico da água no solo, poderia se argumentar que existe relação entre essa variável e a resposta espectral mostrada nas imagens. Objetivando responder a essa pergunta, extraíram-se os valores dos “pixels” nos pontos tensiométricos em cada uma das imagens da Fig. 21, não encontrando correlação linear quando comparados esses valores com os correspondentes à granulometria e potencial mátrico da água no solo.

A Fig. 22 mostra o resultado obtido com a imagem da câmara Dycam ADC. A Dycam ADC é uma câmara digital para uso em agricultura, onde as imagens são obtidas na banda do infravermelho próximo, através de filtro apropriado. Os principais problemas encontrados na utilização desta câmara são o fato dela não ter sido projetada para obter imagens aéreas mas, sim, ao nível do terreno, o que dificultou o seu manuseio nas missões de vôo, bem como limitações quanto à calibração do equipamento para a

obtenção das imagens na banda do infravermelho. Além disso, houve problemas para se realizar a correção geométrica, pois os pontos de controle no terreno não eram facilmente distinguíveis na imagem. Como consequência dessas limitações, aproveitou-se apenas uma data de voo em termos de imagem.

Tem-se na Fig. 22 a diferenciação da resposta espectral da cultura em duas subáreas (azul e amarelo) que, comparando-se com os mapas texturais e de potencial mátrico, têm pouca ou nenhuma relação visual com a distribuição espacial de argila, areia e a distribuição espacial da leitura dos tensiômetros. Após extração dos valores dos “pixels”, também não foram encontradas correlações lineares com os parâmetros relativos ao solo.

Figura 22. Resultado da análise de agrupamento para imagem obtida com a câmara Dycam ADC em 12/05/97.

4.3.2. Dependência espacial do valor dos “pixels”

A dependência espacial das informações contidas em imagens digitais tem sido pouco estudada devido a que, sabe-se pouco do porquê da natureza e causas da variação contida nas informações das imagens (Woodcock et al., 1988a; Woodcock et al., 1988b). No entanto, resultados obtidos por Cohen et al., (1990) estudando a dependência espacial

do dossel de coníferas em imagens obtidas por fotografia aérea, encorajou o presente trabalho para conhecer essa dependência.

Quantitativamente, as cores são armazenadas no computador em valores que variam de 0-255. Então, com os valores dos pixels extraídos nas imagens sem tratamento digital, com o objetivo de se obter a maior variabilidade possível (Chavez, 1992), foram feitos semivariogramas, determinando-se a existência de dependência espacial nos resultados. Os semivariogramas experimentais e os parâmetros dos modelos ajustados para as imagens obtidas com a câmara Minolta são apresentados na Fig. 23 e na Tabela 6 a seguir.

Figura 23. Semivariogramas para imagens obtidas com a câmara Minolta em (a) 12/05/97, (b) 21/05/97, (c) 27/05/97e (d) 25/06/97.

Os resultados apresentados anteriormente permitem fazer os seguintes comentários: a) observa-se nos parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas (Tabela 6) que o efeito pepita é relativamente alto; b) o alcance obtido parece ser

congruente com o desenvolvimento da cultura pois, nas etapas inicial e final do desenvolvimento a refletância pode ser heterogênea (pouca cobertura) e, portanto, o alcance deverá ser menor. O contrário acontece nos períodos intermediários da cultura, nos quais ela praticamente cobre a superfície do solo.

Tabela 6. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas das imagens obtidas com a câmara Minolta das quatro missões de voo.

Data	Modelo	C_0^1	C_s^2	a^3
12/05/97 ⁴	Esférico	2,24	1,28	11,25
21/05/97 ⁴	Exponencial	1,14	3,53	25,50
27/05/97 ⁴	Esférico	1,14	1,40	30,24
25/06/97 ⁴	Esférico	2,23	7,13	11,88

¹. Efeito pepita ou “nugget”; ². “Sill”; ³. Alcance ou “Range”; ⁴. Data de leitura do potencial mátrico.

Analogamente, para a câmara Dycam, obteve-se o variograma mostrado na Fig. 24. O modelo ajustado foi do tipo exponencial e os parâmetros do modelo foram: efeito pepita = 1,70, “sill” = 3,05 e alcance = 37,7m. O alcance encontrado é superior ao alcance para a mesma data para a imagem obtida com a câmara Minolta. Chavez (1992), estudando a variabilidade espacial em filmes no visível e no infravermelho, concluiu que as imagens nessa última banda apresentam maior variabilidade.

Figura 24. Semivariograma para imagem obtida com a câmara Dycam em 12/05/97.

Visto que não houve correlação linear entre o valor dos pixels nas imagens estudadas e os atributos do solo, e considerando a existência de estrutura espacial para os valores dos pixels nessas imagens, procedeu-se a simular as imagens obtidas pela técnica da “krigagem” objetivando encontrar dependência espacial, conforme têm feito Woodcock et al. (1988a, 1988b) com fotografias aéreas obtidas em campos agrícolas e transformadas a formato digital utilizando “scanner”. Os resultados dessas simulações para as imagens obtidas com as câmaras Minolta e Dycam são apresentadas nas Figs. 25 e 26 respectivamente.

Observa-se na Fig. 25 uma relação com as isolinhas de argila e areia (Figs. 14 e 15, respectivamente), principalmente das Figs. 25a e 25d pelo fato de se ter coincidência nas áreas influenciadas pelos terraços. Em relação às isolinhas de potencial mátrico da água no solo e as isolinhas do valor dos “pixels”, em ambos os pares de figuras para cada data de leitura, observa-se coincidência principalmente em relação a valores obtidos no final do raio do pivô. Mesmo não tendo um padrão definido entre as simulações das imagens e o potencial mátrico, a ocorrência das variáveis medidas parece ser mais evidente quando os valores foram maiores (em termos absolutos, no caso dos tensiômetros) do que o contrário. Finalmente, pode-se observar menor variabilidade entre os pares de variáveis potencial mátrico e simulações de imagens nas duas primeiras datas de leitura do que nas duas últimas.

A simulação feita com a imagem obtida utilizando-se a câmara Dycam ADC (Fig. 26), apresenta padrão praticamente nulo com relação às isolinhas de argila e areia e às isolinhas de potencial mátrico da data correspondente (12/05/97). Em princípio, as imagens obtidas com essa câmara deveriam ter mostrado maior variabilidade espacial (faixa do infravermelho) do que as obtidas com filme convencional, na porção do visível do espectro eletromagnético.

Os resultados obtidos ainda poderiam ser explorados procurando-se achar correlação espacial utilizando semivariogramas cruzados e co-krigagem (Vieira et al., 1983). Embora não fazendo parte dos objetivos do presente trabalho a aplicação dessa parte da teoria das variáveis regionalizadas, reconhece-se a importância dessa interessante

ferramenta para o estudo das relações que regem a estrutura espacial da refletância em culturas irrigadas, especificamente do feijão.

Figura 25. Resultados das simulações das imagens obtidas com a câmara Minolta em (a) 12/05/97, (b) 21/05/97, (c) 27/05/97 e (d) 25/06/97.

Segundo Vieira et al. (1983), o resultado dessa metodologia teria a sua aplicação na determinação de uma das variáveis em relação a outra, o que é muito útil quando uma das duas é mais fácil de se medir do que a outra.

Além disso, tem-se conhecimento que em determinados casos, a não existência de correlação linear não significa necessariamente a não existência de dependência espacial conjunta, isto é, correlação espacial (Gonçalves³, A.C., 1997): os semivariogramas cruzados e a co-krigagem explicariam esse fato.

Figura 26. Resultado da simulação da imagem obtida com a câmara Dycam ADC em 12/05/97.

4.4. Rendimento obtido

O rendimento médio de feijão em grão obtido na área experimental resultou em 1650 kg.ha⁻¹ o que foi considerado um pouco abaixo do rendimento esperado pelo Departamento de Agricultura, devido ao fato de ser em regime de irrigação. As causas

³ Antônio Carlos A. Gonçalves, Professor da Universidade Estadual de Maringá -PR-. Estudante de Doutorado em Irrigação e Drenagem pela ESALQ/USP, (comunicação pessoal).

disso vão desde a planta até os parâmetros físicos e químicos do solo bem como às condições climáticas durante o ciclo da cultura, bem como as perdas durante a colheita.

Foi feita a colheita em três parcelas que correspondem à parte mais argilosa da área (ver Fig. 14), à parte média e à parte que representa o final do raio pivô. O rendimento obtido para cada uma dessas sub-áreas, corresponde a 42%, 30% e 28% do rendimento médio, respectivamente.

4.5. As limitações do trabalho

O presente trabalho apresenta limitações que são descritas a seguir objetivando uma melhor performance no desenho de dispositivos experimentais em trabalhos futuros semelhantes ao presente. As seguintes reflexões são feitas:

- a. a fertilidade do solo não foi considerada no estudo da variabilidade espacial. A justificativa disso, mesmo sabendo-se que não é suficiente, é que a cultura foi adubada e então, assumiu-se “homogeneidade” no solo quanto à parte química;
- b. os erros associados à leitura dos tensiômetros devido a variações no valor da conductância hidráulica das cápsulas porosas não foram considerados. Não foram encontrados trabalhos que estudaram em termos quantitativos esse fato;
- c. a câmara digital Dycam ADC utilizada teve baixo rendimento em termos de qualidade das imagens obtidas. Além de ser um equipamento fabricado para sua utilização ao nível do solo, a resolução espacial não permitiu discriminar com clareza, áreas diferentes em termos de resposta espectral;
- d. quanto à análise dos resultados, tanto dos atributos do solo como dos valores dos “pixels”, os fenômenos estudados foram considerados isotrópicos. Sabe-se que alguns atributos relativos ao solo bem como as informações contidas em imagens são geralmente anisotrópicos (Vieira et al. 1983; Woodcock et al., 1988a; Woodcock et al., 1988b).

5. CONCLUSÕES

O conteúdo de argila e de areia apresentaram dependência espacial até 27,57m e 26,80m respectivamente. O modelo ajustado aos semivariogramas de ambos os parâmetros foi o esférico. O conteúdo de silte não apresentou estrutura;

o potencial mátrico apresentou, após a retirada de valores periféricos, dependência espacial média de 21m para as quatro datas de leitura dos tensiômetros. O modelo modal ajustado aos semivariogramas foi o exponencial ;

a classificação não-supervisionada das imagens, através da análise de agrupamento, não foi suficiente para encontrar áreas diferenciadas na resposta espectral da cultura em função da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo estudados;

não houve correlação linear entre o valor dos “pixels” e os parâmetros relativos ao solo. No entanto, encontrou-se dependência espacial da resposta espectral da cultura a distâncias de 11,25m; 25,50m; 30,24m e 11,88m para cada uma das quatro missões de voo, respectivamente;

nas condições em que foi realizado o trabalho, a fotografia aérea convencional mostrou-se pouca promissora, visando ao seu uso no monitoramento de áreas irrigadas.

ANEXO A

Valores medidos de granulometria e potencial mátrico (ψ_m).

Coordenadas (m)		Granulometria (%)			Potencial mátrico (kPa) nas diferentes datas			
X	Y	Argila	Silte	Areia	12/05/97	21/05/97	27/05/97	25/06/97
106,9	16,5	56,92	17,21	25,87	45,3	39,3	11,5	36,0
105,6	25,6	58,03	15,04	26,93	30,6	17,1	6,4	20,0
104,3	34,7	57,79	13,42	28,79	28,6	36,6	11,1	8,0
103,4	44	58,28	12,30	29,43	31,0	62,1	15,0	8,0
103,2	53,6	57,26	16,84	25,90	36,0	25,2	8,0	8,0
105,2	11,9	58,22	15,51	26,27	48,0	51,2	11,7	11,0
103,5	21,1	58,85	12,88	28,27	40,4	49,5	12,2	17,0
102,2	29,6	59,71	13,77	26,52	33,0	19,0	9,3	11,0
101,4	37,2	58,56	15,49	25,95	40,1	40,8	8,8	9,5
100,7	45,8	55,40	18,20	26,40	39,3	16,9	6,3	9,0
100,5	54,8	58,61	11,95	29,44	25,2	20,8	8,6	9,1
101	63	58,02	15,34	26,64	27,5	20,8	8,8	8,5
97,1	4	58,44	16,28	25,28	18,6	12,7	8,1	9,0
95,5	12,9	58,06	16,61	25,33	19,2	21,3	8,0	7,0
93,8	22,1	57,45	14,50	28,05	20,2	37,7	10,0	9,0
92,5	30,7	56,20	15,39	28,41	11,4	18,8	8,0	6,0
91,7	38,8	56,17	15,93	27,90	11,6	17,1	8,0	18,0
91,2	47	54,90	16,48	28,62	10,1	10,0	6,7	13,3
91,2	55,2	54,47	15,70	29,83	10,0	9,0	6,7	13,3
91,7	63,8	54,15	17,23	28,62	14,0	13,0	7,9	21,0
93	72,5	54,71	15,31	29,98	19,4	13,4	7,3	10,1
94,6	80,4	52,11	15,02	32,87	16,6	23,1	8,3	8,3
90,4	83,5	50,89	18,12	30,99	9,7	15,0	8,4	11,0
91,1	86,2	47,98	21,58	30,44	10,3	13,6	9,8	11,2
94,7	107,1	52,75	14,88	32,37	9,2	18,3	6,1	8,6
106,9	111,8	44,05	24,56	31,40	12,0	24,7	11,3	11,1
117	117,9	51,15	11,59	37,27	13,6	42,1	8,6	11,0
131,7	111,7	47,60	18,12	34,28	15,8	42,9	9,1	8,6
85,5	73,4	49,49	20,06	30,45	10,6	14,0	6,2	8,5
86,3	77,2	50,52	18,27	31,20	9,3	11,0	7,7	8,8
90,8	93,8	47,85	17,86	34,28	8,2	9,0	6,0	9,1

continua...Valores medidos de granulometria e potencial mátrico (ψ_m).

Coordenadas (m)		Granulometria (%)			Potencial mátrico (kPa) nas diferentes datas			
X	Y	Argila	Silte	Areia	12/05/97	21/05/97	27/05/97	25/06/97
99,8	108,7	55,41	16,75	27,84	8,1	9,4	7,7	9,8
113,9	119,5	54,00	15,11	30,89	9,0	18,4	8,5	9,8
128,6	121,7	55,95	15,22	28,83	9,0	25,6	8,4	9,0
135,3	107,4	53,93	13,14	32,93	9,1	23,3	8,5	9,1
88,2	0	43,05	18,24	38,71	18,8	11,8	7,7	6,0
86,6	8,8	41,90	20,44	37,67	11,1	11,6	8,2	9,5
84,9	17,5	44,20	16,05	39,75	7,6	8,1	6,6	8,1
83,4	26,7	44,59	16,05	39,36	8,8	10,4	7,1	8,4
82,3	36,7	46,81	17,56	35,63	9,7	8,3	7,3	8,1
81,8	46	41,58	19,04	39,37	17,3	14,1	7,2	15,5
81,5	61,9	44,30	18,82	36,88	13,1	33,3	7,8	8,6
81,9	65,3	46,18	16,12	37,71	13,5	40,3	8,8	7,1
84,8	83	45,41	17,90	36,68	19,5	29,2	6,2	7,1
91	100,9	48,35	14,62	37,04	15,5	18,8	6,3	6,0
102,9	115,7	47,25	15,00	37,75	11,6	16,0	9,9	9,8
118,9	124,3	43,72	16,21	40,06	15,6	55,6	11,2	12,0
135,5	118,1	43,09	18,46	38,45	10,0	24,2	6,8	6,3
77,4	5,6	42,46	20,71	36,83	15,8	19,4	9,7	11,3
75,3	16,3	46,73	16,24	37,02	16,0	13,7	7,0	12,2
73,6	26,7	39,35	19,85	40,80	9,0	78,2	9,2	8,9
72,4	36,8	42,52	19,77	37,71	6,6	37,9	6,4	8,1
71,8	46,2	44,42	17,91	37,67	6,9	59,5	8,9	7,5
72,5	64,4	45,98	20,02	34,01	6,8	11,6	6,5	7,1
75,6	83,9	46,09	17,29	36,63	9,3	22,1	6,1	6,4
81,4	102,5	47,03	17,64	35,34	6,8	10,4	6,5	6,9
92,6	119,2	48,08	16,15	35,78	12,3	26,8	8,4	8,2
108,7	130,4	49,12	14,37	36,52	10,5	24,4	7,9	10,6
127,4	135,3	50,01	15,35	34,64	12,5	39,1	9,9	11,5
143,5	125,9	43,32	17,80	38,89	10,8	14,4	9,4	10,1
62,2	47,1	48,23	14,56	37,21	19,1	58,1	11,3	9,8
149,5	133,6	44,74	17,39	37,87	8,1	14,4	8,2	7,4
66	15	43,64	18,09	38,27	10,1	12,2	7,0	7,0
64,1	25,8	42,70	20,42	36,87	9,9	25,2	8,1	13,5
62,7	36,9	40,92	18,74	40,34	7,3	27,0	8,2	17,9
63	64,4	47,27	14,41	38,32	7,3	14,0	7,3	10,1
65,9	84,6	45,94	15,97	38,09	8,4	16,4	7,1	13,1
71,7	104,5	41,02	20,39	38,59	12,2	17,7	8,0	15,1
81,9	121,8	47,29	14,76	37,95	13,6	51,7	10,7	10,7
115,7	143,4	45,30	15,81	38,89	13,5	52,2	9,7	8,5
134,6	145,1	52,32	12,82	34,86	13,7	66,8	11,2	9,5
155,6	118,7	47,04	16,60	36,36	14,1	65,2	12,0	12,8

continua... Valores medidos de granulometria e potencial mátrico (ψ_m)

Coordenadas (m)		Granulometria (%)			Potencial mátrico (kPa) nas diferentes datas			
X	Y	Argila	Silte	Areia	12/05/97	21/05/97	27/05/97	25/06/97
56,1	15,6	46,85	16,87	36,28	6,0	18,5	6,1	7,3
54,3	25,7	47,23	16,34	36,44	6,1	12,1	6,1	10,3
52,8	36,8	42,95	16,12	40,93	7,0	18,7	7,5	15,6
52,4	47	46,71	21,97	31,32	6,4	11,0	6,1	8,5
53,2	66	45,04	18,86	36,10	7,7	9,6	7,4	8,7
56,5	86,6	47,60	18,12	34,28	7,1	17,7	6,6	13,4
62,1	106,9	46,63	20,75	32,63	7,3	22,7	6,0	12,8
71,2	124,5	50,95	12,57	36,48	8,9	21,4	7,6	11,0
85,9	139,6	52,62	16,12	31,26	9,6	16,0	7,7	10,2
104,3	150	51,30	15,48	33,22	19,7	34,7	8,1	11,1
115,8	153,8	45,82	17,59	36,59	11,6	26,3	8,3	9,8
125,1	155,3	49,74	14,66	35,60	25,6	36,4	7,8	10,0
145,9	152,2	45,10	16,38	38,52	12,5	20,4	9,1	8,5
160,7	137,8	47,79	17,66	34,56	9,9	25,6	8,7	11,9
166	117,9	44,06	16,00	39,93	13,6	41,9	10,2	10,2
46,1	16,7	41,72	17,62	40,66	8,5	16,1	6,8	7,9
44,2	26,6	41,81	20,79	37,40	8,7	16,3	8,1	13,3
42,9	36,9	42,32	17,55	40,13	6,9	23,1	8,6	6,8
42,5	47,2	43,81	17,30	38,88	6,4	11,1	7,1	11,7
43,6	66,5	40,02	23,62	36,36	7,4	9,3	5,7	7,8
46,1	87	40,69	21,24	38,07	5,9	9,2	6,0	6,8
51,2	107,3	48,74	14,31	36,95	5,4	10,0	5,3	12,0
59,7	125,5	42,48	19,13	38,39	8,4	24,8	6,9	6,7
72,8	140,8	53,23	12,63	34,14	9,7	23,2	5,7	7,5
90	153,3	46,19	17,66	36,15	9,4	21,5	8,4	18,6
109,3	161,8	45,75	17,64	36,61	16,3	44,6	9,2	12,6
119,8	164	45,18	15,25	39,57	20,6	65,6	9,3	11,8
129,9	165,4	44,62	12,85	42,53	8,0	12,0	6,8	8,5
150,5	160,8	45,21	15,78	39,01	11,5	56,0	8,5	9,9
166,7	146,9	48,92	17,84	33,24	9,1	16,1	10,0	10,1
173,9	127,3	42,06	16,18	41,77	8,0	11,0	7,6	7,6
35,3	26,3	45,72	14,77	39,51	7,5	11,0	6,5	9,3
34,1	36,1	45,78	17,43	36,78	8,3	29,7	7,7	8,9
32,5	47	44,13	19,68	36,18	15,3	60,0	7,5	12,8
32,7	55,6	44,70	18,53	36,78	8,3	19,0	8,4	9,7
33	65,8	44,14	18,75	37,11	7,4	27,2	8,2	9,5
33,8	75,3	45,04	17,29	37,67	6,8	10,1	6,5	8,1
34,9	84,5	41,18	18,86	39,96	6,6	10,0	6,5	7,9
36,9	94,1	46,26	18,50	35,25	9,5	16,7	6,7	9,4
39,7	103,8	41,19	14,30	44,50	12,1	53,7	7,0	11,8
47,3	121,2	48,09	15,27	36,64	13,4	33,2	7,2	14,0

continua...Valores medidos de granulometria e potencial mátrico (ψ_m)

Coordenadas		Granulometria			Potencial mátrico (kPa) nas diferentes			
(m)		(%)			datas			
X	Y	Argila	Silte	Areia	12/05/97	21/05/97	27/05/97	25/06/97
57,8	138,5	45,09	15,89	39,02	13,9	73,9	8,4	12,5
72,2	153,1	45,54	16,59	37,87	14,3	54,4	9,1	12,9
89,9	164,4	46,00	13,25	40,75	6,7	78,8	6,6	8,3
109,6	172,3	45,19	14,60	40,21	7,1	66,8	10,8	8,1
129,9	175,8	45,34	17,81	36,85	8,7	12,9	8,1	9,6
149,8	172,3	40,68	18,94	40,37	18,5	73,1	9,2	10,1
167,3	161,3	49,30	14,84	35,87	48,4	57,3	11,6	11,1
179,6	144,9	43,29	18,71	38,00	42,9	48,5	9,2	9,9
184,7	124,5	43,38	17,13	39,49	43,4	74,6	8,4	12,1
24,9	34,7	51,45	18,78	29,76	17,3	27,2	8,0	9,2
23,4	45,6	58,13	13,23	28,64	7,5	11,0	7,7	9,7
23	55,9	49,88	19,21	30,91	8,3	75,3	7,0	8,0
23,3	66	54,79	14,87	30,34	7,4	14,7	6,7	7,1
24,4	76,9	53,21	18,20	28,59	8,6	14,2	7,1	7,0
25,8	87,7	53,21	20,47	26,31	7,3	12,2	6,4	6,8
28	98	54,98	14,92	30,10	6,3	8,3	6,0	8,2
30,6	107	52,14	17,84	30,02	7,0	11,0	6,5	6,2
34,1	115,9	48,37	22,19	29,44	7,2	17,0	6,8	7,3
42,6	132,7	51,45	18,78	29,76	8,1	15,3	7,3	6,9
54,6	149,7	52,57	18,59	28,83	7,9	13,2	7,0	9,4
67,6	162,1	53,25	18,22	28,53	15,6	29,6	9,0	12,0
85,7	173	49,69	18,13	32,18	13,1	27,6	9,7	11,9
104,4	180,8	53,48	16,63	29,89	11,7	16,4	9,6	13,3
125,4	185	53,25	14,90	31,84	38,8	51,0	10,8	13,3
146,2	184,1	45,03	18,86	36,11	20,3	37,0	7,3	8,4
165,6	175,1	51,40	17,11	31,48	10,2	16,7	9,8	10,4
181,2	161,4	45,41	19,89	34,70	23,0	79,0	10,5	9,1
190,8	142,9	42,93	18,05	39,01	28,0	47,9	7,5	10,1
195	122,7	45,45	21,57	32,98	26,7	79,5	11,7	18,4
13,7	47,1	42,35	20,13	37,52	16,9	28,9	7,0	7,1
13,4	56,8	42,30	23,36	34,34	5,7	18,1	5,8	6,2
13,8	66,4	38,51	33,26	28,23	5,5	11,2	6,4	5,9
14,7	75,7	41,91	20,43	37,66	7,8	74,0	7,0	6,5
16,2	85,8	42,12	17,28	40,61	8,3	57,1	7,0	20,7
18,1	96,1	39,35	23,54	37,10	5,6	27,3	5,9	7,2
20,7	105,9	45,15	22,05	32,81	9,5	28,6	7,5	6,9
24,1	115,8	44,86	23,86	31,28	7,2	21,2	6,2	16,5
32,2	133,3	45,71	25,07	29,22	7,1	33,8	7,4	6,1
42,1	149,2	48,67	21,68	29,65	6,6	18,5	6,7	6,3
55,5	164,3	51,03	14,24	34,73	6,8	14,4	7,3	9,8
71,2	175,4	50,49	20,14	29,37	6,6	16,0	7,0	9,9

continua...Valores medidos de granulometria e potencial mátrico (ψ_m)

Coordenadas (m)		Granulometria (%)			Potencial mátrico (kPa) nas diferentes datas			
X	Y	Argila	Silte	Areia	12/05/97	21/05/97	27/05/97	25/06/97
89,8	184,9	52,58	17,51	29,90	6,5	60,8	9,3	10,3
109,5	191,4	47,89	20,41	31,70	6,5	62,1	6,5	7,5
130,3	194,5	48,64	17,28	34,08	59,3	77,2	9,2	8,8
149,6	193	48,96	18,55	32,49	85,9	83,6	9,4	9,3
7,1	87,9	42,75	19,80	37,45	11,4	15,0	8,0	9,0
9,1	98,3	38,40	22,98	38,62	7,8	11,3	7,8	8,8
11,5	107,5	44,17	18,40	37,43	7,6	13,6	8,1	9,1
14,9	117,3	37,84	24,25	37,91	8,5	12,0	7,5	10,8
23,4	136,1	38,48	23,02	38,50	12,5	73,0	9,5	13,0
34,2	153,9	35,42	23,17	41,41	19,1	31,6	8,3	10,7
47	168,6	35,37	23,14	41,50	24,5	64,9	8,4	9,6
63,1	181,6	39,00	25,00	36,00	21,1	73,5	8,7	9,2
81,1	191,1	41,74	21,37	36,89	25,3	65,5	7,7	7,2
100,5	198,4	41,05	17,95	41,00	27,3	43,8	7,6	8,9
120,5	202,4	40,71	17,80	41,49	13,9	23,7	10,2	10,0
5,8	77,9	40,88	17,87	41,25	15,5	53,0	8,3	9,7
4,8	67,5	40,88	17,87	41,25	14,3	75,1	9,8	7,8
0	100,7	52,05	19,89	28,06	14,0	23,3	9,0	10,8
2,6	110,4	48,80	18,26	32,94	10,2	17,5	8,9	9,2
5,7	119,8	48,48	20,57	30,95	10,3	16,6	9,5	11,8
9,5	129,3	51,41	20,42	28,17	13,3	21,1	9,5	8,6
14,1	139,2	54,76	15,48	29,76	10,4	15,1	8,4	8,7
24,4	156,1	54,53	15,42	30,06	12,6	29,5	10,5	8,2
36,5	171,3	56,31	17,10	26,59	13,4	37,4	9,4	11,8
49,9	183,8	56,68	12,04	31,28	25,2	63,7	9,2	11,6
36,6	171,3	48,75	14,96	36,29	26,7	61,4	9,0	8,5
50	183,9	45,40	15,78	38,82	83,5	75,2	11,1	7,5
16,8	161,9	47,52	19,11	33,37	84,3	74,6	8,2	7,7
29,5	177,6	43,84	17,44	38,72	79,0	72,3	11,7	7,3
66,2	194,3	49,57	12,48	37,95	86,4	75,0	9,2	8,4
85,3	202,9	52,44	13,46	34,10	76,7	65,0	9,9	7,3
114	113,1	51,23	14,52	34,25	10,9	38,7	9,1	8,6
117,6	108,4	50,79	14,39	34,82	9,5	12,0	7,8	7,6
143,2	104,5	47,46	17,43	35,11	81,1	72,0	8,5	8,3

ANEXO B

Estatísticas dos resultados obtidos nas validações cruzadas para os modelos ajustados aos semivariogramas.

Tabela 1. Estatísticas da validação cruzada para argila.

Estatístico	Medido	Estimado	Diferença	Desv. Reduzido
Mínimo	35,37	40,53	-11,84	-3,64
1º quartil	43,84	45,16	-2,44	-0,599
Mediana	47,03	47,14	-0,22	-0,054
3º quartil	51,45	49,29	2,57	-0,594
Máximo	59,71	58,63	15,73	3,55
N	188	188	188	188
Média	47,80	47,81	0,015	0,000
Desvio padrão	5,44	3,7	4,68	1,104

Tabela 2. Estatísticas da validação cruzada para areia.

Estatístico	Medido	Estimado	Diferença	Desv. Reduzido
Mínimo	25,28	26,06	-11,09	-2,98
1º quartil	30,45	33,11	-2,70	-0,73
Mediana	35,87	34,93	0,040	0,011
3º quartil	37,95	36,69	2,33	0,661
Máximo	44,5	39,69	10,55	3,695
N	188	188	188	188
Média	34,62	34,60	-0,020	-0,002
Desvio padrão	4,47	2,87	3,96	1,085

Tabela 3. Estatísticas da validação cruzada para o potencial mátrico (kPa) lido em 12/05/97.

Estatístico	Medido	Estimado	Diferença	Desv. Reduzido
Mínimo	5,4	7,011	-16,297	-5,631
1 ^o quartil	7,7	9,169	-3,697	-0,771
Mediana	10,0	11,002	0,617	0,134
3 ^o quartil	14,0	13,568	2,539	0,546
Máximo	31,0	25,671	12,271	5,374
N	169	169	169	169
Média	12,116	11,760	-0,355	-0,067
Desvio padrão	58,63	34,11	49,75	1,167

Tabela 4. Estatísticas da validação cruzada para o potencial mátrico (kPa) lido em 21/05/97.

Estatístico	Medido	Estimado	Diferença	Desv. Reduzido
Mínimo	8,1	11,422	-61,48	-3,40
1 ^o quartil	14,4	20,383	-12,509	-0,71
Mediana	23,1	28,839	2,714	0,143
3 ^o quartil	47,9	39,614	13,047	0,682
Máximo	83,6	72,599	48,302	2,217
N	188	187	187	187
Média	31,808	31,403	-0,149	-0,007
Desvio padrão	217,46	132,28	204,54	1,091

Tabela 5. Estatísticas da validação cruzada para o potencial mátrico (kPa) lido em 27/05/97.

Estatístico	Medido	Estimado	Diferença	Desv. Reduzido
Mínimo	5,3	6,261	-3,163	-2,54
1º quartil	7,0	7,400	-0,838	-0,62
Mediana	8,0	8,000	0,096	0,073
3º quartil	9,2	8,837	0,853	0,69
Máximo	12,2	10,65	4,250	3,58
N	187	186	186	186
Média	8,168	8,148	-0,008	-0,003
Desvio padrão	15,18	10,01	12,77	1,002

Tabela 6. Estatísticas da validação cruzada para o potencial mátrico (kPa) lido em 25/06/97.

Estatístico	Medido	Estimado	Diferença	Desv. Reduzido
Mínimo	5,9	7,238	-5,913	-2,86
1º quartil	7,9	8,819	-1,325	-0,65
Mediana	9,1	9,457	0,112	0,055
3º quartil	10,7	9,973	1,363	0,66
Máximo	15,6	12,409	4,838	2,37
N	178	178	178	178
Média	9,419	9,434	0,0152	0,006
Desvio padrão	20,90	9,24	21,48	1,02

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M.I.F. Introdução à análise exploratória de dados. Piracicaba: ESALQ, DME, 1987. 40p.

ARRUDA, F.B.; ZULLO Jr, J.; OLIVEIRA, J.B. de. Parâmetros do solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 11, n.1, p.11-15, 1987.

BARNETT, V.; LEWIS, T. Outliers in statistical data. New York:: John Wiley, 1984. 463p. (Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics)

BORGELT, S.C.; SEARCY, S.W.; STOUT, B.A.; MULLA, D.J. Spatially variable liming rates: a method for determination. Transactions of the ASAE, v.37, n.5, p.1499-1507, 1994.

CHAVEZ Jr, P.S. Comparison of spatial variability in visible and near-infrared spectral image. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v.58, n.7, p.957-964, 1992.

CLINE, M.G. Principles of soil sampling. Soil Science, v.58, p.275-288, 1944

COHEN, W.B.; SPIES, T.A.; BRADSHAW, G.A. Semivariograms of digital imagery for analysis of conifer canopy structure. Remote Sensing of Environment, v.34, n.3, p.167-178, 1990.

CRESSIE, N.A.C. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1993. 900p.

CREPANI, E. **Princípios básicos de sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 1983. 45p.

CURRAN, P.J. **Principles of remote sensing**. New York: John Wiley, 1988. 282p.

DENISON, R.F.; MILLER, R.O.; BRYANT, D.; ABSHAHI, A.; WILDMAN, W. Image processing extracts more information from color infrared aerial photos. **California Agriculture**, v.50, n.3, p.9-13, 1996.

DOOREMBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**, Paraíba: UFPB, 1994. 306p. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem).

DOURADO NETO, D. Variabilidade espacial das alturas de chuva e irrigação e de potenciais da solução do solo. Piracicaba, 1989. 180p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

EASTMAN, R.J. **Idrisi for windows: user's guide**. version 1.0. Worcester: Clark University, 1995. 1v.

EMERSON, J.D.; HOAGLIN, D.C. Gráficos de caule-e-folhas. In: HOAGLIN, D.C.; MOSTELER, F.; TUCKEY, J.W. (Ed.) **Análise exploratória de dados: técnicas robustas; um guia**. Lisboa: Ed. Salamandra, 1983. p.7-31.

EMERSON, J.D.; STRENIO, J. Caixas-de-bigodes e comparação de coleções. In: HOAGLIN, D.C.; MOSTELER, F.; TUCKEY, J.W. (Ed.) **Análise exploratória de dados: técnicas robustas; um guia**. Lisboa: Ed. Salamandra, 1983. p.59-96.

- ENGLUND, E.; SPARKS, A. **Geostatistical environmental assessment software: user's guide; geo-eas v1.2.1.** Las Vegas: International Ground Water Modeling Center, 1991. 130p.
- FOLEGATTI, M.V. Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade e do armazenamento de água em solo siltoso. Piracicaba, 1996. 84p. Tese (Livro-Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- GREER, J.D.; HOPPUS, M.L.; LACHOWSKY, H.M. Color infrared photography for resources management. **Journal of Forestry**, v.88, n.7, p.12-17, 1990.
- HAMLETT, J.M.; HORTON, R.; CRESSIE, N.A.C. Resistant and exploratory technics for use in semivariogram analysis, **Soil Science Society of America Journal**, v.50, n.3, p.868-875, 1986.
- HART, W. E. Subsurface distribution of nonformly applied surface waters. **Transactions of the ASAE**, v.15, n.3, p.656-666, 1972.
- HOAGLIN, D.C. Letras-resumo: um conjunto de estatísticas ordinais selecionadas. In: HOAGLIN, D.C.; MOSTELER, F.; TUCKEY, J.W. (Ed.) **Análise exploratória de dados: técnicas robustas; um guia.** Lisboa: Ed. Salamandra, 1983. p.32-58.
- HOFFER, R.M. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In: SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. (Ed.) **Remote sensing: the quantitative approach.** New York: McGraw-Hill, 1978. p.227-290.
- KECKLER, D. **Surfer for windows: user's guide**, v.6: Contouring and 3D surface mapping. Colorado: Golden Software, 1995. 1v.

KHOSLA, R.P. From photons to bits. **Physics Today**, p.42-49, Dec. 1992.

KÖEPPEN, W. **Climatología: con un estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478p.

LANTIERI, D. Use of high-resolution satellite data and aerial sampling photographs for irrigation potential assessment project in Chad. In: FAO. **Use of remote sensing techniques in irrigation and drainage**. Rome, 1995. p.45-52. (FAO. Water Reports, 4)

LEVRAULT, F.; PUECH, J. Étude, par photographie aérienne numérisée, de la variabilité interparcellaire d'une culture de soja diversement irriguée. **Agronomie**, v.13, n.3, p.209-216, 1993.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: ESALQ, DFM, 1995. 560p.

LIBARDI, P.L. Determinação da condutância hidráulica e da pressão de burbulhamento de cápsulas porosas para tensiômetros. Piracicaba: DFM, 1996. 6p.

LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O.; TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.1-12, 1996.

LIGHT, D.L. Film cameras or digital sensors?: the challenge ahead for aerial imaging. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.62, n.3, p.285-291, 1996.

LLILESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. New York: John Wiley, 1994. 420p.

- MALLANTS, D.; BINAYAK, P.; JACQUES, D.; FEYEN, J. Spatial variability of hydraulic properties in a multilayered soil profile. **Soil Science**, v.161, n.3, p.167-181, 1996.
- MARTHALER, H.P.; VOGELSANGER, W.; RICHARD, F.; WIERENGA, P.J. A pressure transducer for field tensiometers. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, p.624-627, 1983.
- MATHER, P.M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. New York: John Wiley, 1994. 352p.
- MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its application**. Paris: École National Supérieure de Mines de Paris, 1971. (Les cahiers du centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, 5).
- McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, v.37, n.4 p.617-639, 1986.
- MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Heterogeneidade dos pontos experimentais de curvas de retenção da água no solo. **Scientia Agricola**, v.50, n.3, p.393-403, 1993.
- MORAN, S.M. Irrigation management in Arizona using satellites and airplanes. **Irrigation Science**, v.15, n.1, p.35-44, 1994.
- NANDAGIRI, L.; PRASSAD, R. Relative performance of textural modelin estimating soil moisture characteristics. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.123, n.3, p.211-214, 1997.

- NIELSEN, D.R.; BIGGAR, W.; ERH, K.T. Spatial variability of field-measured soil-water properties. *Hilgardia*, v.42, n.7, p.215-260, 1973.
- NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgar Blücher, 1989. 308p.
- PAIVA, J. B. D. Uniformidade de aplicação de água, abaixo da superfície do solo, utilizando irrigação por aspersão. São Carlos, 1980. 333p. Dissertação(Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos.
- PANATIER, Y. **Variowin: software for spatial data analysis in 2D**. New York: Springer-Verlag, 1996. 93p.
- PARKIN, T.B.; ROBINSON, J.A. Analysis of lognormal data. *Advances in Soil Science*, v.20, p.193-235, 1992.
- PEARSON, R.; GRACE, J.; MAY, G. Real-time airborne agricultural monitoring. *Remote Sensing of Environment*, v.49, p.304-310, 1994.
- PENAFORTE, A. B. Análise da performance de um sistema de irrigação por aspersão convencional, acima e abaixo da superfície do solo. Lavras, 1992. 76p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Lavras.
- PHILLIPS, T.L.; SWAIN, P.H. Data-processing methods and systems, In: SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. (Ed.) **Remote sensing: the quantitative approach**. Local: McGraw-Hill, 1978. p.188-216.
- PRICE, J.C. On the information content of soil reflectance spectra, *Remote Sensing of Environment*, v.33, n.2, p.113-121, 1990.

- REICHARDT, K.; **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba, ESALQ, DFM, 1996. 513p.
- REICHARDT, K.; VIEIRA, S.R.; LIBARDI, P.L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.10, n.1, p.1-6, 1986.
- REZENDE, R. ; FRIZONNE, J. A. ; BOTREL, T. A. Desempenho de um sistema de irrigação pivô central quanto à uniformidade de distribuição de água abaixo e acima da superfície do solo. **Engenharia na Agricultura**, v.2, n.19, p.1-7, 1993.
- RICHARDS, J.A. **Remote sensig digital image analysis: an introduction**. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 340p.
- SILVA, L.F. Radiation and instrumentation in remote sensing. In: SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. (Ed.) **Remote sensing: the quantitative approach**. New York: McGraw-Hill, 1978. p.21-133.
- SMITH, R.C.G.; PRATHAPAR, S.A.; BARRS, H.D. Use of thermal scanner image of a water stressed crop to study soil spatial variability. **Remote Sensing of Environment**, v.29, n.2, p.111-120, 1989.
- STATISTICAL GRAPHICS CORPORATION. **Statgraphics: Statistical graphics system v.7**. Rockville, 1993.
- THIEL, T.J.; FOUSS, J.L.; LEECH, A.P. Electrical water pressure transducer for field and laboratory use. **Soil Science Society of america Proceedings**, v.27, n.5, p.601-602, 1963.

- TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v.38, p.45-94, 1985.
- TUELLER, P.T.; LENT, P.C.; STAGER, R.D.; JACOBSEN, E.A.; PLATOU, K.A. Ranged vegetation changes measured from helicopter-borne 35-mm aerial photography. **American Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, v.54, n.5, p.609-614, 1988.
- VAREKAMP, C.; SKIDMORE, A.K.; BURROUGH, P.A.B. Using public domain geoestatistical and GIS software for spatial interpolation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.62, n.7, p.845-854, 1996.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; VACHAUD, G.; NIELSEN, D.R. The use of Cokriging with limited field soil observations. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, n.2, p.175-184, 1983.
- VETTORAZZI, C.A. **Sensoriamento remoto orbital**. Piracicaba, ESALQ, DER, 1992. 134p. (Série didática, 2).
- VIEIRA, S.R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. Campinas: IAC, 1997. 1-87p.
- VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Spatial variability of field-mesurement infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, p.1040-1048, 1981.
- VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v.51, n.3, 1-75p, 1983.

APÊNDICE 1

Avaliação do pivô central

A avaliação do pivô central foi feita conforme às normas da ABNT (12.02.08-005) e aos padrões da ASAE (S436, 1983).

A distribuição da água foi medida através de duas linhas de coletores dispostas radialmente formando um ângulo de 3°.

Lâmina do pivô central a 100%.

APÊNDICE 2

Teste de condutância hidráulica dos tensiômetros

A metodologia utilizada é o método de carga decrescente proposto por Libardi (1996) calculando a condutância com a equação a seguir:

$$C = \frac{a \ln \left(\frac{H_1}{H_2} \right)}{t_2 - t_1}$$

onde C = condutância hidráulica (m²/s), a = área da seção transversal do tubo de vidro (m²), H₁ e H₂ são a carga hidráulica (mca) na cápsula nos tempos t₁ e t₂ respectivamente, t₁ e t₂ é o intervalo de tempo (s) em que o nível de água no tubo de vidro leva para cair de H₁ para H₂. Observa-se a homogeneidade da condutância hidráulica nas cápsulas porosas dos tensiômetros utilizados no experimento

Condutância hidráulica numa amostra de cápsulas porosas dos tensiômetros utilizados no experimento.