

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA UMIDADE DO SOLO EM
IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SOB CULTIVO PROTEGIDO**

IVANA FÚRIO BATISTA

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de concentração em Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU – SP

Janeiro – 2002

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA UMIDADE DO SOLO EM
IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SOB CULTIVO PROTEGIDO**

IVANA FÚRIO BATISTA

Orientador Prof. Dr. Célia Regina Lopes Zimback

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de concentração em Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU – SP

Janeiro – 2002

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

Batista, Ivana Fúrio, 1967-
B333v Variabilidade espacial da umidade do solo em irrigação por gotejamento sob cultivo protegido / Ivana Fúrio
Batista. -- Botucatu, [s.n.], 2002
xiii, 113 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) -- Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas
Orientador: Célia Regina Lopes Zimback
Inclui bibliografia

1. Geoestatística 2. Solos - Umidade 3. Irrigação por gotejamento 4. Estufa (Plantas) I. Zimback, Célia Regina Lopes II. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas III. Título

Palavras-chave: Geoestatística; Dependência espacial; Irrigação por gotejamento; Umidade do solo; Plasticultura

Paciência

Meu filho, se entrares para o serviço de Deus,
permanece firme na justiça e no temor,
e prepara a tua alma para a provação;
humilha teu coração, espera com paciência,
dá ouvidos e acolhe as palavras de sabedoria;
não te perturbes no tempo de infelicidade,
sofre as demoras de Deus;
dedica-te a Deus, espera com paciência,
a fim de que no derradeiro momento tua vida se enriqueça.
Aceita tudo que te acontecer.
Na dor, permanece firme,
na humilhação, tem paciência.
Pois é pelo fogo que se experimentam o ouro e a prata,
E os homens agradáveis a Deus, pelo cadinho da humilhação.
Põe tua confiança em Deus e ele te salvará,
Orienta bem o teu caminho e espera nele.
Conserva o temor dele até na velhice.

(Eclesiástico 2: 1-6)

À DEUS

E

À NOSSA SENHORA

por me fazerem sentir a sua presença e vida em todos os momentos de minha caminhada; nos momentos felizes em que me conduziram pela mão e também nos momentos de desânimo e dificuldades, em que me seguraram em seus braços.

AGRADEÇO

Ao meu querido irmão **VALDINEI**

que já não faz mais parte de nossa existência, mas sei que de onde está, sua presença viva em minha vida, me fortalece.

À minha querida irmã **DERCI** e

ao meu cunhado **IBRAIM**

pelo apoio e incentivo em todas as minhas realizações.

Aos meus queridos sobrinhos

ARNALDO, DANIELLE, RODRIGO e THAÍS

os quais ousou chamar de “meus filhos”; pela felicidade que trouxeram à minha vida.

OFEREÇO**AOS MEUS PAIS**

Ao meu querido pai **ARNALDO**, a quem sou eternamente grata pela minha formação profissional e por me transmitir uma infindável perseverança e coragem de lutar.

À minha querida mãe **NOEMIA**, divino exemplo de mãe, com sua constante e incansável dedicação em todos os momentos de nossas vidas.

AO MEU ESPOSO

“RUBINHO”, meu eterno companheiro, pelo amor, pelo apoio incondicional e por fazer seus todos os meus sonhos.

DEDICO**AGRADECIMENTOS ESPECIAIS**

Neste momento tão importante de minha escolha profissional, não poderia deixar de lembrar e agradecer a todos os que me auxiliaram ou que, às vezes, em diversos momentos, caminharam comigo.

À Professora Dra. Célia Regina Lopes Zimback, que desde 1986 me privilegia com seus ensinamentos, quando ainda minha professora no Curso de Graduação, e agora, como minha orientadora, agradeço imensamente pelos conhecimentos científicos transmitidos, pelo estímulo à pesquisa, pela orientação, pela convivência enriquecedora e pela amizade construída.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio concedido na concretização desse trabalho.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas – FCA/UNESP – Campus de Botucatu, por me oferecer à oportunidade de aperfeiçoar os meus conhecimentos.

Ao Prof. Dr. Raimundo Leite Cruz, Coordenador do Curso de Pós-Graduação “Irrigação e Drenagem” no início do meu curso e ao atual Coordenador Prof. Dr. João Carlos Cury Saad, por todo o estímulo recebido.

Aos Professores Doutores Célia Regina Lopes Zimback, Flávio Ferrari Aragon, Hélio Grassi Filho, Ivan Amaral Guerrini, João Francisco Escobedo, Leonardo Theodoro Büll, Lourival Cavalcante Ferreira, Marcos Antonio de Rezende Maria Helena Moraes, Maria Lúcia Toralles Pereira, Miriam Celí Pimentel Porto Foresti, Raimundo Leite Cruz, Sérgio Hugo Benez pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Prof. Dr. Ângelo Cataneo, pela amizade e estímulo concedido.

Ao Prof. Dr. Norberto da Silva, pela concessão da estufa para a realização do experimento.

À todos os funcionários da Fazenda Experimental São Manuel, pela responsabilidade e profissionalismo na condução das pesquisas realizadas, em especial, ao Nilton Antonio de Moraes, José Luís Zanela, Geraldo Lourençon, Luís Antonio da Silva e Luís Antonio Gallo, agradeço todo o auxílio recebido durante a realização do experimento. Agradeço ainda, particularmente ao Nilton, sua esposa Maria José e sua filha Gelta Juliana pela carinhosa acolhida.

Ao Eng^o Agr^o Luiz Andrade, pela concessão de todo o sistema de irrigação (Scarcelli do Brasil Ltda.) para a realização do experimento.

A todos os funcionários do Departamento de Recursos Naturais – Solos, e em especial ao José Carlos De Pieri, José Garcia H. Pires, Jair Vieira, Maria Aparecida de Lima Alves, Noel Batista e Sônia Regina Siono pelo auxílio concedido em algumas atividades e também pela convivência.

Ao pessoal da Seção Pós-Graduação: Kátia Otomo Duarte, Marilena do Carmo Santos, Marlene Rezende e Jaqueline de Moura Gonçalves pelo atendimento concedido.

À Maria Inês de Andrade e Cruz, Diretora do Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação, por toda atenção prestada na correção das referências bibliográficas.

Ao Gilberto Winckler, funcionário do Departamento de Engenharia Rural pela contribuição na implantação do experimento.

A todos os amigos do Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas (GEPAG), André, Cleonisse, Débora, Edson, Letícia, João, Robson, Saulo e em especial ao Caetano, Luciana, João Batista, Renato e Rodrigo pelo auxílio em algumas atividades.

À amiga Juliana Aguiar Vettorato, cujo auxílio transcendeu os seus limites, e pelo qual sou imensamente grata.

Aos companheiros de curso Alexandre, Carlos, Cristina, Glauco, Karen e Marcelo pela amizade construída.

Ao Prof. Eng^o Agr^o MS. Carlos Alberto Oliveira de Matos, meu professor no Curso de Graduação, pela amizade, pelo apoio e pelas sugestões concedidas no desenvolvimento desse trabalho.

Ao Prof. Pedro Veridiano Baldotto, meu professor no Curso de Graduação, pelo incentivo e amizade.

À Professora Eng^a Agr^a Célia Aparecida Benício Rodrigues, pelo companheirismo e amizade nestes últimos dez anos.

À Professora Mirtes Brochado Falcone, pela amizade e compreensão na realização deste trabalho.

Às amigas Eliane Estela de Freitas, Ieda Francischetti, Júlia Maria de Brito Alves, Luciane Rezende Costa Kill, Silvia Helena Sarmiento Beccari Ciciliati, Rita de Cássia Pereira, pela amizade sincera em todos os anos de nossa convivência.

Ao meu sogro Irto Carlos Batista e minha sogra Alini Muniz Batista, por me acolherem como filha.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE QUADROS.....	XII
LISTA DE FIGURAS.....	XIII
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	8
4.1 Geoestatística.....	8
4.1.1 Variograma.....	12
4.1.1.1 Características do variograma.....	14
4.1.1.2 Modelos de variograma.....	19
4.1.1.2.1 Modelos com patamar ou modelos de transição.....	19
4.1.1.2.2 Modelos sem patamar.....	24
4.1.1.3 Ajuste do Variograma.....	26
4.1.2 Krigagem.....	27
4.1.3 Validação Cruzada.....	31
4.2 Utilização da Geoestatística na pesquisa agrônômica do solo e água.....	32
4.3 Irrigação por gotejamento.....	54
4.4 Umidade do solo.....	59
4.5 Cultivo em ambiente protegido.....	63
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	69

5.1 Caracterização da área experimental.....	69
5.2 Material.....	72
5.2.1 Material utilizado para a montagem do experimento.....	72
5.2.1.1 Caracterização da estufa e malha experimental.....	72
5.2.1.2 Equipamento de irrigação.....	74
5.2.1.3 Material utilizado para a determinação da umidade do solo.	76
5.2.1.4 Programas computacionais.....	77
5.3 Métodos.....	77
5.3.1 Manejo da irrigação.....	77
5.3.2 Método de coleta e determinação da umidade do solo.....	79
5.3.3 Análise geostatística dos dados.....	79
5.3.4 Interpolação dos dados.....	81
5.3.5 Validação cruzada.....	82
6 RESULTADOS EDISCUSSÃO.....	83
6.1 Coeficiente de uniformidade de distribuição e vazão dos gotejadores.....	83
6.2 Análise espacial.....	84
6.2.1 Análise variográfica.....	84
6.2.2 Interpolação dos dados – krigagem.....	90
6.2.3 Validação cruzada.....	93
7 CONCLUSÕES.....	96
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1: Características químicas da área experimental, na profundidade de 0-20 cm.....	71
2: Valores dos teores de água no solo (g.g^{-1}) e potencial matricial (kPa) para a camada de 0-20cm.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Página
01: Figura esquemática do variograma.....	13
02: Variograma linear.....	21
03: Variograma esférico.....	22
04: Variograma exponencial.....	23
05: Variograma gaussiano.....	24
06: Variograma de Modelo Linear sem Patamar.....	25
07: Esquema da grande malha experimental demarcada na estufa, contendo os quatro adensamentos e os respectivos pontos de amostragem.....	73
08: Vista da estufa utilizada para a condução do experimento.....	75
09: Disposição do sistema de irrigação por gotejamento e dos tensiômetros.....	76
10: Variograma anisotrópico da umidade do solo (%) na direção 0°.....	85
11: Variograma anisotrópico da umidade do solo (%) na direção 45°.....	87
12: Variograma anisotrópico da umidade do solo (%) na direção 90°.....	87
13: Variograma anisotrópico da umidade do solo (%) na direção 135°.....	88
14: Superfície 2D do variograma anisotrópico.....	88
15: Superfície 3D do variograma anisotrópico.....	89
16: Representação bidimensional da Krigagem da umidade do solo.....	91
17: Representação tridimensional da Krigagem da umidade do solo.....	92
18: Validação cruzada da umidade do solo.....	93

1 RESUMO

Foi estudada a variabilidade espacial da umidade do solo num sistema de irrigação por gotejamento em uma estufa de 5,0 x 20,0m (100 m²) na Fazenda Experimental São Manuel, da Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Botucatu, localizada no Município de São Manuel, Estado de São Paulo, Brasil. A malha de amostragem foi estabelecida em 1,0 x 0,5m, acrescida de quatro adensamentos de 0,25m. Foram utilizados dados de umidade do solo em 178 pontos. A profundidade do solo definida para coletar as amostras usadas para a determinação de umidade do solo foi de zero a vinte centímetros. As determinações de umidade do solo foram realizadas no Laboratório de Análise Física do Solo da Faculdade de Ciências Agrônomicas/UNESP. A análise da dependência espacial foi obtida com o auxílio do Programa GS+ “Geostatistical for Environmental Sciences”, Versão 5.0 (GS+, 2000), que utiliza os valores de umidade do solo,

associados às suas respectivas coordenadas de campo. Para esse processo, foi construído o variograma experimental e definido o modelo de ajuste do variograma, de modo que a curva que melhor se ajustou aos pontos obtidos representasse a magnitude, alcance e intensidade da variabilidade espacial da variável estudada. Verificou-se que a umidade do solo apresentou distribuição espacial anisotrópica. A dependência espacial foi notada para a direção 0°, caracterizada como dependência alta, com o alcance de aproximadamente 3,30m, no sentido do comprimento da estufa. Entretanto, no sentido da largura da estufa, não foi possível ajustar modelos. Embora o cálculo do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) tenha sido de 98%, utilizando a representação gráfica da superfície, a área estudada apresentou um maior teor de água na parte inicial e menor na parte final das linhas de distribuição de água. A krigagem mostrou-se um bom interpolador para mapeamento da umidade do solo em irrigação por gotejamento sob cultivo protegido.

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL MOISTURE ON A DRIP IRRIGATION SYSTEM UNDER GREENHOUSE. Botucatu, 2002. 113p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: IVANA FÚRIO BATISTA.

Adviser: CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK.

2 SUMMARY

Soil moisture spatial variability on a drip irrigation system was studied in a greenhouse of 5,0 x 20,0 (100m²) at Experimental Farm São Manuel/FCA, from UNESP – Botucatu – Campus, located in São Manuel County, São Paulo State, Brazil. The sampling was established in a grid of 1,0 x 0,5m, increased with four thickenties of 0,25m. Soil moisture data were used in 178 points. The soil depth defined to collect the samples used for soil moisture determination was from zero to 20cm. The soil moisture determinations were accomplished in the Soil Physical Analysis Laboratory from FCA/UNESP. The spatial dependence analysis was obtained with the aid of the GS+ Program “Geostatistical for Environment Sciences”, Version 5.0 (GS+, 2000), which uses the soil moisture values associated with their respective field coordinates. For this process, the experimental variogram was built and the variogram model fit defined, so that the best curve fitted to the obtained points represented the magnitude, range and intensity of the studied variable spatial variability.

It was verified that soil moisture presented anisotropic spatial distribution. Spatial dependence was noticed for the direction 0° , characterized as high dependence, with the range of approximately 3,30m, in the direction of the length of the greenhouse. However, in the direction of the width of the greenhouse, it wasn't possible to fit models. Although, the calculation of the Distribution Uniformity Coefficient (CUD) had been 98%, using the surface graphic representation, the studied area presented a larger water content in the initial part and a smaller one in the final part of water distribution lines. The kriging was shown a good interpolator for soil moisture mapping on a drip irrigation system in greenhouse.

Keywords: geostatistics, spatial dependence, soil moisture, drip irrigation, greenhouse.

3 INTRODUÇÃO

Ao estudar-se a variabilidade do solo, podem ser utilizados, basicamente, dois enfoques que se diferenciam na forma de análise dos dados. A estatística tradicional, que exige a validade de algumas hipóteses básicas sobre as variáveis, como a independência entre as observações, a variância constante e a distribuição normal dos dados; e a geoestatística, que vem apresentando uma aplicação crescente na avaliação da variabilidade espacial de diversos parâmetros de interesse em ciências agrárias, permitindo a interpretação dos resultados baseados na estrutura da sua variabilidade natural, levando em consideração a existência da dependência espacial dentro do espaço de amostragem.

A preocupação com a variabilidade espacial do solo pode ser encontrada em trabalhos da primeira metade do século passado, mas só recentemente foi

possível a incorporação da geoestatística na descrição da variabilidade de forma coerente, tanto na teoria, como na prática.

Nos últimos anos, observou-se um avanço nas áreas de monitoramento por satélite, dos registros georreferenciados e da informática, o que possibilitou o surgimento de uma nova concepção de manejo dos recursos na agricultura. Com o advento das técnicas de agricultura de precisão, observa-se um grande conjunto de práticas agrícolas altamente adaptadas às condições de ambiente e variabilidades das propriedades do solo. Nos vários simpósios realizados nos Estados Unidos da América sobre técnicas de agricultura de precisão, concluiu-se que os primeiros resultados de aplicações em áreas agrícolas são muito satisfatórios, em relação ao aumento de lucratividade e redução dos impactos ambientais. Um dos pilares nos quais se sustenta este novo paradigma na agricultura é o conhecimento das causas da variabilidade dos parâmetros do solo que influenciam a produtividade das culturas.

Com o crescente incremento das técnicas de agricultura de precisão, é de fundamental importância o conhecimento da variabilidade da distribuição da umidade, para que sistemas de irrigação por gotejamento mais adequados e precisos sejam dimensionados, segundo a necessidade do solo e de uma cultura, numa determinada estufa. Também precisa ser considerada, porque o manejo da água está diretamente relacionado com as exigências hídricas das diversas culturas, com as características hidráulicas dos diferentes sistemas de irrigação utilizados, com a capacidade de retenção da água pelo solo, na profundidade efetiva do sistema radicular de uma cultura em questão. Na plasticultura, é notável a importância da utilização da irrigação, repondo a água consumida, tornando-se um fator de garantia da produção agrícola. Em cultivos protegidos, o sistema de gotejamento é preferido, não somente pela economia de água, mas também pelo fato de ser um sistema que não molha a superfície

das folhas, sendo utilizado na grande maioria das culturas, principalmente nas que são suscetíveis ao ataque de fungos.

Com o objetivo de estudar a distribuição da umidade do solo, determinada pelo método gravimétrico, o presente estudo foi desenvolvido sob condições de cultivo protegido e irrigação por gotejamento.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Geoestatística

Ao considerarmos uma determinada propriedade que apresente uma variação de um local para outro, com um certo grau de organização ou continuidade, caracterizado por dependência espacial, utilizam-se os métodos tradicionais da estatística não espacial associados aos métodos geoestatísticos.

Landim (1998) atribui a origem da geoestatística à África do Sul, onde pesquisadores, destacando entre eles o engenheiro de minas D. G. Krige e o estatístico H.S. Sichel, desenvolveram empiricamente, uma técnica própria de estimação que, posteriormente, recebeu um tratamento formal levado a cabo pelo grupo liderado por Matheron, no Centre de

Morphologie Mathematique, em Fontainebleau, França, sendo que os trabalhos iniciais datam de 1962 e 1963.

Matheron (1963) concretizou os fundamentos da geoestatística, desenvolvendo a Teoria das Variáveis Regionalizadas. Definiu a variável regionalizada como sendo uma função espacial numérica, que apresenta uma variação de um local para outro, com uma continuidade aparente, caracterizando uma certa dependência espacial. Para isso, baseou-se em conceitos de função aleatória e estacionariedade de segunda ordem.

Considere-se um campo de estudo S , no qual foram coletados n valores de uma determinada propriedade $\{Z(x_i), i=1, \dots, n\}$, com $x_i = (\bar{x}_i, \bar{y}_i)$, $i = 1, \dots, n$ são os pontos de amostragem em S ; $Z(x_i)$, $i=1, \dots, n$ são os valores amostrados nas posições x_i . Esse procedimento é usado para simplicidade de representação na dedução das equações. O ponto de referência para o sistema de coordenadas é arbitrário e fixado a critério do interessado. Para uma dada posição fixa, x_k , cada valor medido da variável em estudo, $Z(x_k)$ pode ser considerado como uma realização de uma certa variável aleatória, $Z(x_k)$. A variável regionalizada, $Z(x_k)$, para qualquer x_i dentro do campo de área S , por sua vez, pode ser considerada uma realização do conjunto de variáveis aleatórias $\{Z(x_i)$, para qualquer x_i dentro de $S\}$. Esse conjunto de variáveis aleatórias é chamado de função aleatória e é simbolizada por $Z(x_i)$, (Journel & Huijbregts, 1978). Portanto, $Z(x_i)$, $i = 1, \dots, n$ são os valores amostrados nas posições x_i .

Segundo Vieira (1995) e Freitas (2000), com uma única amostragem, tudo o que se conhece de uma função aleatória $Z(K_i)$ é uma única realização. Então, se quiser estimar valores para os locais não amostrados, ter-se-á que introduzir a restrição de que a variável regionalizada seja, necessariamente, estacionária estatisticamente. Formalmente, uma

variável regionalizada é estacionária se os momentos estatísticos da variável aleatória $Z(x_i + h)$ forem os mesmos para qualquer vetor h . De acordo com o número k de momentos estatísticos que são constantes, a variável é chamada de estacionária de ordem k . Estacionariedade de ordem 2 é tudo que é requerido em geoestatística (Olea, 1975, citado por Vieira, 1995).

Segundo Journel & Huijbregts (1978), Isaaks & Srivastava (1989) e Vieira (1997), uma função aleatória é estacionária quando a sua lei de distribuição espacial não varia por translação, isto é, $[Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)]$ apresenta uma mesma lei de distribuição que $[Z(x_1 + h), Z(x_2 + h), \dots, Z(x_n + h)]$, para qualquer vetor de translação h . Isto implica que, para um fenômeno em estudo, os fatores influenciados tenham agido de forma similar em toda a área de estudo, sendo as diferenças verificadas com uma função do vetor de separação h .

Segundo Journel & Huijbregts (1978), uma função aleatória $Z(x_i)$ é estacionária de ordem 2 se:

a) o valor esperado $E[Z(x_i)]$ existir e não depender da posição x_i , ou seja,

$$E[Z(x_i)] = m, \quad \forall x_i \in S \quad (01)$$

onde m é uma constante.

b) para cada par de variáveis aleatórias, $\{Z(x_1), Z(x_1 + h)\}$ a função covariância, $C(h)$, existir e for função de h , ou seja,

$$C(h) = E [Z(x_i) Z(x_i + h)] - m^2, \quad " x_i \hat{\mathbf{I}} S \quad (02)$$

A equação (01) representa a estacionariedade do primeiro momento estatístico, enquanto que a equação (02) representa a estacionariedade da covariância, que implica na estacionariedade da variância e do variograma (Journel & Huijbregts, 1978; Vieira et al, 1983).

Ainda, Vieira et al. (1983) afirmaram que a hipótese de estacionariedade de ordem 2 implica na existência de uma variância finita dos valores medidos, $\text{Var}(Z(x_i)) = C(0)$. Esta hipótese não pode ser satisfeita para alguns fenômenos físicos os quais tem uma capacidade infinita de dispersão. Diante dessa possibilidade uma hipótese menos restritiva chamada hipótese intrínseca é requerida (Vieira et al., 1983). A referida estacionariedade intrínseca, que requer apenas a existência e estacionariedade do variograma, que pode ser aplicada, sendo definida por:

$$a) \quad E [Z(x_i)] = m, \quad " x_i \hat{\mathbf{I}} S \quad (03)$$

$$\text{Var} [Z(x_i) - Z(x_i + h)] = E [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 = 2g(h), \quad " x_i \hat{\mathbf{I}} S \quad (04)$$

Para a aplicação da geoestatística, é de fundamental importância o estudo da função $\gamma(h)$, conhecida como variograma.

4.1.1 Variograma

A função da variância espacial permite verificar a dependência espacial através da medida da variância das diferenças dos valores amostrais entre todos os pontos, separados por uma distância h . Esta função é definida por:

$$\mathbf{g}(h) = \frac{1}{2} E [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (05)$$

A função da variância espacial pode ser, em termos práticos, estimada por:

$$\mathbf{g}^*(h) = \frac{1}{2 N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (06)$$

onde $N(h)$ é o número de pares de valores amostrados, $[Z(x_i), Z(x_i+h)]$, separados pelo vetor h (Journel & Huijbregts, 1978). O variograma normalmente é representado pelo gráfico de $\gamma^*(h)$ versus h , isto é, variância espacial do atributo versus distância Vieira (1997). O gráfico $\gamma^*(h)$ versus h é chamado de variograma experimental e expressa a variabilidade espacial entre as amostras, sendo uma função que só depende do vetor h , e, portanto depende de ambos, magnitude e direção de h .

Segundo Vieira (1995) e Freitas (2000), a razão do prefixo “semi” para a função variograma, deve-se ao fato da equação (04) poder ser escrita na forma da equação (05), anteriormente descrita.

Vários trabalhos de estudo da água no solo têm utilizado a função variograma para verificar a dependência espacial entre as variáveis relacionadas ao comportamento da água (Sales, 1992; Brooker & Winchester, 1995; Folegati, 1996; Netto et al., 1999; Utset & Castellanos, 1999; Sousa & Pereira, 1999; Brooker, 2001, entre outros).

A representação esquemática do variograma, com seus respectivos parâmetros (C_0 , $C_0 + C_1$ e a) é apresentada na Figura 01, conforme Takeda (2000):

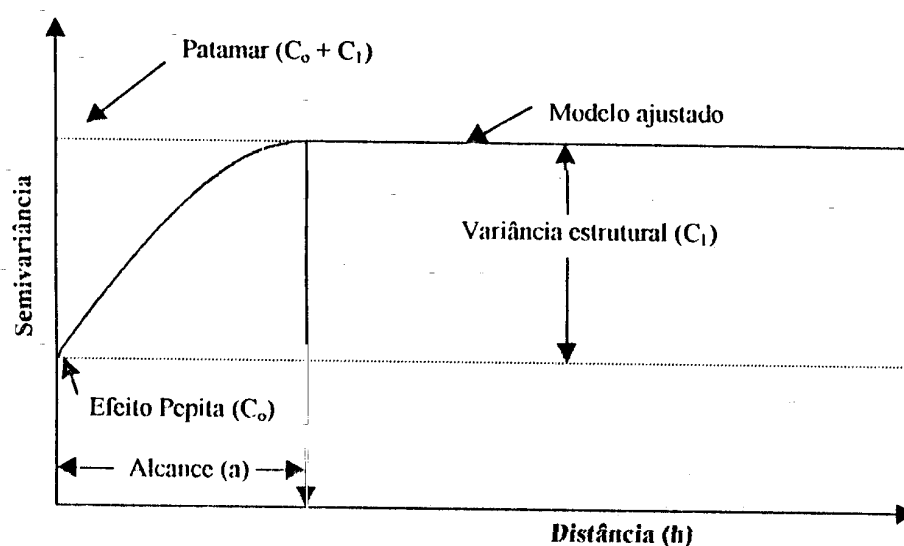


Figura 01: Figura esquemática do variograma.

Fonte: Takeda (2000)

A Figura 01 mostra um variograma com características bem próximas do ideal, o seu comportamento representa o que, intuitivamente, se deve esperar de dados de campo.

4.1.1.1 Características do variograma

As características do variograma, bem próximas do ideal, serão comentadas a seguir:

- Efeito Pepita (C_0):

Pela definição de variograma; equação (06), $\gamma(0) = 0$, quando $h = 0$.

Espera-se que as diferenças $[Z(x_i) - Z(x_{i+h})]$ decresçam assim que h , a magnitude de separação entre elas, decresça. É esperado também que localizações mais próximas sejam mais parecidas do que observações separadas por distâncias maiores. Para um processo estacionário de 2ª ordem, $\gamma(0) = 0$, como mostrado pela equação que define o variograma (equação 06). Entretanto, na prática (Delhomme, 1976, Campbell, 1978, Hajrasulih et al., 1980, Burgess e Webster, 1980, citados por Vieira et al., 1983) quando h aproxima de 0 (zero), $\gamma(h)$ é aproxima de um valor positivo chamado de Efeito Pepita (“nugget effect”) e que recebe o símbolo C_0 . Este valor revela a descontinuidade do variograma próximo à origem em distâncias menores do que a menor distância de amostragem. Delhomme, em 1976, citado por Vieira et al. (1983) atribui que a descontinuidade pode ser devida à variabilidade em escalas menores do que à distância de amostragem.

Ainda, segundo Delhomme, em 1976, citado por Vieira (1995), revela que parte dessa descontinuidade pode ser também devida a erros de medição, mas é impossível quantificar qual contribui mais, se os erros de medição ou a variabilidade em uma escala menor do que aquela amostrada.

Zimback (2001) comenta que o Efeito Pepita (C_0) corresponde ao ponto onde o variograma corta o eixo das ordenadas.

Segundo Valente (1989), o Efeito Pepita reflete microestruturas não captadas pela menor escala de amostragem, de análises laboratoriais, entre outros.

O Efeito Pepita é, portanto, um parâmetro importante do variograma, indicando a variabilidade não explicada ao se considerar a distância de amostragem. Quando o Efeito Pepita (C_0) for aproximadamente igual ao Patamar ($C_0 + C_1$), tem-se o Efeito Pepita Puro, o que demonstra uma ausência total de dependência espacial para a escala pesquisada (Trangmar et al., 1985).

Uma vez detectada que a amostra não recebe a influência espacial, o método estatístico aplicável é o da estatística não espacial, visto que ocorre uma distribuição espacial totalmente aleatória (Silva et al., 1989, citados por Vieira, 1995).

Cambardella et al. (1994) sugeriram os seguintes intervalos para avaliar a % da variância espacial do efeito pepita: $\leq 25\%$ - forte dependência espacial ou variável espacial fortemente dependente; entre 25% e 75% - moderada dependência espacial ou variável espacial moderadamente dependente e $\geq 75\%$ - fraca dependência espacial ou variável espacial fracamente dependente.

Porém, o programa geoestatístico GS + (GS +, 2000) propõe a seguinte relação:

$$\% \text{ semivariância estrutural} = C / (C + C_0) \cdot 100 \quad (07)$$

Zimback (2001) adaptou os limites propostos por Cambardella et al. (1994), afirmando que a dependência espacial para valores $\leq 25\%$ é considerada fraca; entre 25% e 75%; moderada e $\geq 75\%$ dependência forte.

- Patamar ($C_0 + C_1$):

À medida que h aumenta, $\gamma(h)$ também aumenta até um valor máximo no qual se estabiliza. Este valor no qual $\gamma(h)$ se estabiliza chama-se patamar ("sill") e é aproximadamente igual à variância dos dados (Takeda, 2000 e Vieira, 1995). Segundo Trangmar et al. (1985), o patamar corresponde à variância da amostra (s^2) para dados estacionários. O patamar é, portanto, o ponto onde toda semivariância da amostra é de influência aleatória.

- Alcance (a):

A distância na qual $\gamma(h)$ atinge o patamar é chamada de alcance ("range"), recebe o símbolo de a e é a distância limite de dependência espacial.

Trangmar et al. (1985) afirmaram que amostras separadas por distâncias mais próximas ao alcance são espacialmente relacionadas e que aquelas separadas por distâncias maiores do que o alcance, não são espacialmente relacionadas porque a semivariância iguala a s^2 , implicando variação aleatória; sendo, portanto independentes entre si. Guerra (1988) menciona que o alcance corresponde ao conceito da zona de influência ou de dependência espacial de uma amostra, marcando a distância a partir da qual as amostras tornam-se independentes. Para Folegatti (1996), o valor de ($h = a$), representa a amplitude, e é a máxima distância de separação nas quais os pares de valores observados mantêm-se correlacionados.

É importante salientar que nem sempre os variogramas apresentam os valores $C_0 + C_1$, C_0 ou a . O conhecimento do variograma dos valores médios é fundamental

para a interpolação pelo método da krigagem, o que permite estimar valores da propriedade em questão em locais não amostrados (Folegatti, 1996).

Vieira (1995) considera que quando o gráfico do variograma for idêntico para qualquer direção de h , ou seja, a dependência espacial não varia quando h varia, ele é chamado isotrópico. Se, no entanto, o gráfico for diferente para alguma direção de h , tem-se um fenômeno anisotrópico, sendo que, neste caso, o variograma deve sofrer transformações antes de ser usado. Neste caso, a análise deve ser feita para várias direções, determinando-se os eixos de maior e menor anisotropia. É importante salientar que, a maioria das variáveis de ciência do solo poderá ter um comportamento anisotrópico, isto é, mudar de maneiras diferentes para direções diferentes. Existem algumas maneiras de se transformar um variograma anisotrópico em isotrópico (Journel & Huijbregts, 1978). Em geral, a precisão da interpolação ou o tipo de hipótese satisfeita, não são afetados se, ao invés de se preocupar com escolha de método de transformação de anisotropia, apenas limitar a faixa de distância na qual se utiliza o variograma. De qualquer maneira é sempre aconselhável examinar variogramas para várias direções, antes de tomar decisões. As principais direções que devem ser examinadas são: 0° - na direção do eixo X, 90° - na direção do eixo Y, 45° e -45° (ou 135°) - nas duas diagonais.

As anisotropias mais frequentes são a geométrica e a zonal. Na anisotropia geométrica, o alcance difere em função da direção e o patamar permanece constante. Na anisotropia zonal, têm-se semivariâncias diferentes para um mesmo alcance (Isaaks & Srivastava, 1989).

Torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de trabalhos no sentido de definir o número de observações necessárias para uma ótima amostragem e também

para assegurar a confiabilidade quanto a melhor escolha de um modelo teórico de variograma e o seu posterior ajuste ao variograma experimental.

Nesse sentido, McBratney & Webster (1983) desenvolveram um trabalho em estudos regionais de solo para determinar valores médios de propriedades específicas das amostras de solo. Para esse propósito, a estimativa do número de observações necessárias tem normalmente sido baseadas em teorias de amostragem clássica, sem considerar a dependência espacial nos dados. Como resultado, eles têm sido excessivamente exagerados e muitas vezes, desencorajado os investigadores de prosseguirem seus objetivos. Nesse trabalho, os autores demonstraram um método para determinar o tamanho da amostra, isto é, o número de observações necessárias, levando em conta a dependência espacial. O método depende do conhecimento do variograma para a propriedade de interesse, que é usada para calcular as variâncias na vizinhança de cada ponto de observação, de maneira que o variograma deve ser conhecido antes que uma ótima intensidade de amostragem possa ser escolhida.

Webster & Oliver (1992) consideraram que quando o variograma é feito para situações típicas em solo e observações ambientais, parece que variogramas computados com menos do que 50 dados são de pequeno valor e que no mínimo 100 dados são necessários. Experimentos conduzidos pelos autores sugerem que para variável isotrópica normalmente distribuída, um variograma computado de uma amostra de 150 dados pode muitas vezes ser satisfatório, enquanto um derivado de 225 dados terá maior confiabilidade.

4.1.1.2 Modelos de variograma

Vieira et al. (1983) afirmaram que um dos aspectos mais importantes das aplicações da Teoria das Variáveis Regionalizadas é o ajuste do modelo teórico ao variograma experimental e pode ser um dos maiores recursos de ambigüidade nestas aplicações, visto que, todos os cálculos dependem do valor do variograma para distâncias especificadas. Se o modelo ajustado estiver errado, todos os cálculos seguintes também estarão. Quanto mais simples puder ser o modelo ajustado, melhor. É importante que o modelo ajustado represente a tendência de γ (h) em relação à h. O modelo deve garantir que γ (h) > 0 e γ (-h) = γ (h), qualquer que seja h (Freitas, 2000).

Vieira et al. (1983) afirmaram que dependendo do comportamento do variograma para grandes valores de h, o modelo a ser usado pode ser classificado em duas categorias distintas: modelos com patamar e aqueles sem patamar:

4.1.1.2.1 Modelos com patamar ou modelos de transição

Como h aumenta de zero, γ^* (h) aumenta acima de um certo valor correspondente de h, chamado de **a**, depois que permanece basicamente constante. O valor de γ^* (h) neste ponto que é aproximadamente igual à variância das observações é chamado de patamar, $C_0 + C_1$, e a distância **a**, é chamada de alcance. O alcance é um parâmetro muito importante, visto que medições separadas por distâncias mais próximas do que elas são correlacionadas umas às outras, enquanto que aquelas medições separadas por distâncias maiores do que elas não são correlacionadas. Quando o alcance, **a**, é menor do que a distância de amostragem mais próxima,

tem-se um efeito pepita puro e um fenômeno físico que tem uma distribuição espacial completamente aleatória com respeito à amostragem espacial disponível, métodos de estatística não espacial podem ser aplicados. Entretanto, se amostras são tiradas num espaçamento mais próximo, o variograma pode revelar alguma estrutura. De fato, a existência do efeito pepita puro é somente uma situação que teoricamente permite o uso de métodos de estatística não espacial.

Basicamente, quatro modelos teóricos de transição estão em uso: linear, esférico, exponencial e Gaussiano.

Nas expressões seguintes, descritas por Vieira et al. (1983), Vieira (1995), Takeda (2000) e Freitas (2000), C_0 é o efeito pepita, $C_0 + C_1$ é o patamar e a é o alcance do variograma e d é a máxima distância na qual o variograma está definido.

a) Modelo linear:

$$g(h) = C_0 + (C_1/a) \cdot h \quad \text{quando } 0 < h < a \quad (08)$$

e

$$g(h) = C_0 + C_1 \quad \text{quando } h > a \quad (09)$$

onde C_1/a é o coeficiente angular para $0 < h < a$.

A representação esquemática do Modelo Linear pode ser observada na Figura 02, conforme Freitas (2000).

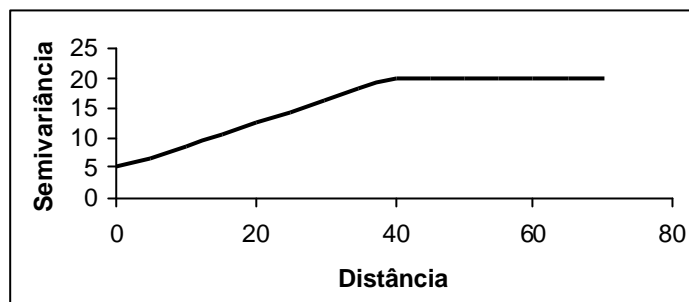


Figura 02: Variograma linear.

Fonte: Freitas (2000)

Nesse modelo, o patamar $C_0 + C_1$ é determinado por inspeção; o coeficiente angular C_1/a 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 $C_1 = \text{patamar} - C_0$.

b) Modelo esférico:

$$g(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad \text{quando } 0 < h < a \quad (10)$$

e

$$g(h) = C_0 + C_1 \quad \text{quando } h > a \quad (11)$$

A representação esquemática do Modelo Esférico pode ser observada na Figura 03, conforme Freitas (2000).

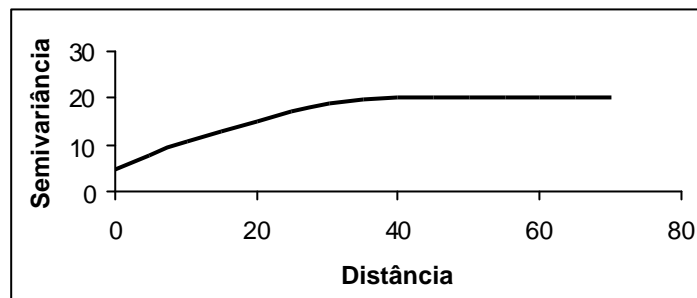


Figura 03: Variograma esférico.

Fonte: Freitas (2000).

O modelo esférico é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita (C_0) e do patamar (C_0 e C_1), posteriormente 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, $a' = 2/3 a$. Assim, o alcance (a) será $= 3 a'/2$. O modelo esférico é linear até aproximadamente $1/3$ de a (alcance).

c) Modelo Exponencial:

$$g(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3 h/a)] \quad \text{quando } 0 < h < d \quad (12)$$

onde d é a máxima distância na qual o variograma é definido.

A representação esquemática do Modelo Exponencial pode ser observada na Figura 04, conforme Freitas (2000).

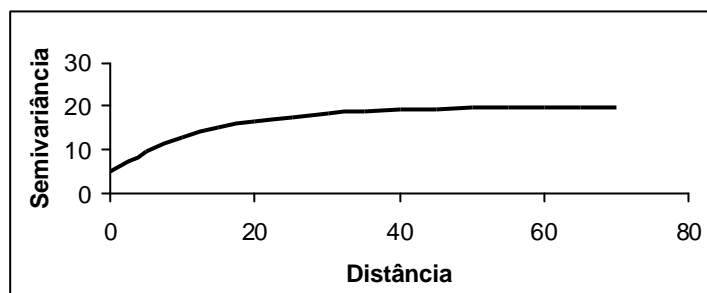


Figura 04: Variograma exponencial.

Fonte: Freitas (2000).

Uma diferença fundamental entre o modelo exponencial e o esférico é que o exponencial atinge o patamar apenas assintoticamente, enquanto que o modelo esférico o atinge no valor do alcance. O parâmetro a é determinado visualmente como a distância após a qual o variograma se estabiliza. Os parâmetros C_0 e C_1 para os modelos exponencial e Gaussiano são determinados da mesma maneira que para o esférico.

d) Modelo Gaussiano:

O Modelo Gaussiano é dado por:

$$g(h) = C_0 + C_1 \{1 - \exp[-3(h^2/a^2)]\} \quad \text{quando } 0 < h < d \quad (13)$$

A representação gráfica do Modelo Gaussiano pode ser observada na Figura 05, conforme Freitas (2000).

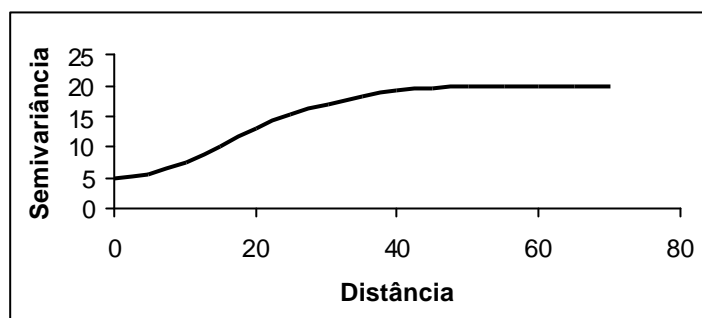


Figura 05: Variograma gaussiano.

Fonte: Freitas (2000).

Cardim (2001), relacionou cinco modelos com patamar: linear, esférico, exponencial e Gaussiano; todos descritos similarmente a Vieira et al. (1983), Vieira (1995), Takeda (2000) e Freitas (2000). Adicionalmente, considerou o Efeito Pepita Puro como um dos modelos com patamar; sendo que o Efeito Pepita Puro foi dado por:

$$g(h) = 0, \text{ se } h = 0 \quad (14)$$

e

$$C_0 + C_1, \text{ quando } h > 0 \quad (15)$$

4.1.1.2.2 Modelos sem patamar

Segundo Journel e Huijbregts (1978), os modelos sem patamar correspondem a fenômenos com capacidade infinita de dispersão, para os quais, nem a variância dos dados, nem a covariância podem ser definidas. Estes modelos podem ser escritos assim:

$$g(h) = C_0 + A \cdot h^B, \text{ sendo} \quad 0 < B < 2 \quad (16)$$

O parâmetro B tem que ser estritamente maior que 0 (zero) e estritamente menor que 2, a fim de garantir que a função $\gamma(h)$ tenha positividade definida condicional, ou seja, a fim de garantir que o variograma satisfaça a condição $\gamma(h) > 0$ e $\gamma(-h) = \gamma(h)$.

Alguns fenômenos podem ter um variograma que mostra estruturas “aninhadas”, ou mais do que uma estrutura. Neste caso, uma combinação de modelos pode ser necessária, ao invés de somente uma.

Isto implica na necessidade de ajustar mais de um modelo, ou um modelo para cada estrutura, pois um modelo único não é suficiente para representar o variograma (Vieira, 1995 e Freitas, 2000).

A representação gráfica do modelo linear sem patamar pode ser observada na Figura 06, conforme Freitas (2000).

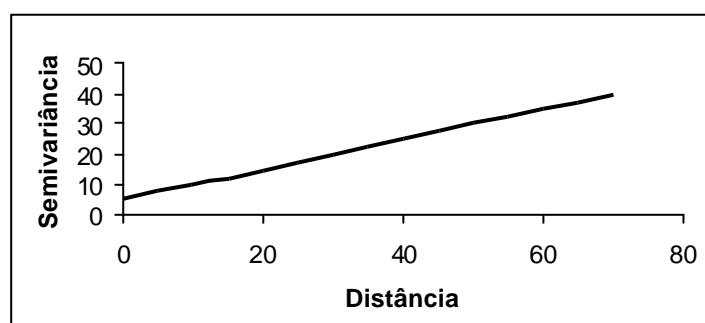


Figura 06: Variograma de Modelo Linear sem Patamar.

Fonte: Freitas (2000).

4.1.1.3 Ajuste do Variograma

Após a construção do variograma, o passo seguinte é ajustá-lo a um modelo matemático, considerando os modelos: linear, esférico, exponencial e Gaussiano.

Segundo Folegatti (1996), estes modelos pressupõem a existência de um valor inicial (efeito pepita), de um valor em torno do qual o variograma se estabiliza (patamar), exceto no caso do modelo linear sem patamar e de um valor de distância (h) para o qual ocorre estabilização (alcance). Caso o modelo linear sem patamar se ajuste ao variograma, pode-se inferir que os dados não apresentam estacionariedade de segunda ordem, sendo válida a hipótese intrínseca, desde que o 1º critério seja atendido. De uma forma geral, a krigagem é robusta em relação ao modelo de variograma, ou seja, diferentes modelos ajustados terminarão por gerar krigagens semelhantes. O ajuste de modelos matemáticos pelo Método dos Quadrados Mínimos Ordinários é desaconselhável, porque este dá igual importância a todos os pontos. No entanto, cada ponto no variograma pode ser gerado a partir de um número diferente de pares, quando se trata de dados originais obtidos a partir de amostragem segundo uma malha, o que associa a cada um deles, diferentes níveis de confiabilidade. Assim, muitos autores argumentam a favor do ajuste segundo um critério visual.

Da mesma forma, Ribeiro Júnior (1995) relatou que o método de ajuste dos modelos de variogramas mais tradicional é o chamado “ajuste a sentimento”. Uma vez obtido o variograma experimental, este serve de indicação visual sobre a forma e os parâmetros do modelo a serem adotados; desse modo com a apresentação e discussão de métodos de ajuste mais disponíveis, a tendência é que o método de “ajuste a sentimento” seja

cada vez mais utilizado, onde as variâncias geradas pelas menores distâncias têm maior peso sobre o ajuste.

Entretanto, de acordo com Goovaerts (1999), a descrição de modelos espaciais é raramente um objetivo por si só. O autor afirma que primeiramente deseja-se detectar a dependência espacial, para posteriormente prever propriedades de solo para locais não amostrados. Um passo fundamental entre descrição e estimação é a modelagem da distribuição espacial dos valores do atributo, mas, segundo o autor, a maneira na qual modelos permissíveis são escolhidos e seus parâmetros (alcance, patamar) são estimados, ainda apresenta controvérsias. Vários métodos têm sido propostos, variando de procedimentos totalmente aleatórios, que envolvem uma escolha automática e ajuste do modelo por aproximações visuais, nas quais o modelo é selecionado assim que o ajuste pareça graficamente satisfatório. Afirma também que, a utilização de critérios estatísticos para reduzir a modelagem do variograma a um exercício de ajuste de uma curva a valores experimentais, é restritivo demais. Concluiu que o objetivo da análise estrutural deve ser a construção de um modelo permissível que capture a maior parte das características do atributo em estudo.

4.1.2 Krigagem

Através da análise do variograma, se for verificada a dependência espacial, poderá estimar-se valores utilizando o procedimento de interpolação conhecido como krigagem, em qualquer posição do campo em estudo, expressando-se os resultados em forma de mapas de isolinhas e mapas de superfícies.

Vieira et al. (1983) mostraram que supondo que se queira estimar valores, z^* , para todas as localizações, x , onde se têm valores não medidos, a estimativa de um ponto qualquer x_0 , pertencente ao espaço amostral, é dada pelo processo de krigagem, definido por:

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

onde:

$Z^*(x_0)$ é o valor estimado no ponto x_0 ;

N é o número de valores medidos, $Z(x_i)$, envolvidos na estimativa;

λ_i são os pesos associados a cada valor medido, $Z(x_i)$.

No método da krigagem, os pesos são variáveis de acordo com a variabilidade espacial expressa no variograma. O que torna a krigagem um ótimo interpolador, então, é a maneira como os pesos são distribuídos (Vieira et al., 1983).

Vieira (1995) menciona que para que o estimador seja ótimo, ele não pode ser tendencioso e deve ter variância mínima.

Segundo Queiroz et al. (1997), a krigagem é uma técnica de interpolação para estimativa dos valores de uma propriedade em locais não amostrados, a partir de valores vizinhos resultantes da amostragem realizada. Ressalta que diversas outras técnicas estão disponíveis para esse propósito, no entanto, a krigagem faz uso de um interpolador linear, não tendencioso e de variância mínima que assegura a melhor estimativa.

Este estimador tem como base os dados amostrais da variável regionalizada e as propriedades estruturais do variograma obtido a partir destes dados.

Conforme descrito por Landim (1998), krigagem, do francês Krigeage e do inglês kriging, é um termo cunhado pela escola francesa de geoestatística em homenagem ao sul-africano e pioneiro na aplicação de técnicas estatísticas em avaliação mineira, D. G. Krige. Afirma que é um processo de estimação de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo variograma. A krigagem pode ser usada para: previsão do valor pontual de uma variável regionalizada em um determinado local dentro do campo geométrico, sendo um procedimento exato de interpolação que leva em consideração todos os valores observados; serve para o cálculo médio de uma variável regionalizada para um volume maior que o suporte geométrico; além de estimação da tendência (“drift”), de modo similar à análise de superfícies de tendência. Em todas essas situações, o método fornece, além dos valores estimados, o erro associado a tal estimação, o que o distingue dos demais algoritmos à sua disposição. Menciona que a krigagem usa informações a partir do variograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar um ponto, ou uma área ou um volume. Como o variograma é uma função da distância entre locais de amostragens, mantendo o mesmo número de amostras, os pesos serão diferentes de acordo com seu arranjo geográfico. A krigagem é descrita como uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estudada a partir de um modelo prévio que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço. As formas mais usuais são conhecidas como krigagem simples, ordinária, universal e intrínseca. Já krigagens não-lineares são regressões lineares de alguma transformação não-linear apropriada aos dados originais, e incluem krigagem lognormal, multigaussiana, indicativa, probabilística e disjuntiva.

Vieira et al. (1983) consideram o método de interpolação por krigagem, baseado na teoria das variáveis regionalizadas ao usar o grau de autocorrelação entre amostras adjacentes, estima valores para qualquer posição coordenada dentro de um domínio medido sem parcialidade e com variância mínima. A maneira como os pesos são distribuídos é que torna a krigagem um ótimo interpolador. Como resultado, estimativa pode ser feita para tantos valores como um orçamento computadorizado vai permitir. Finalmente, os autores afirmaram que muitos contornos de mapas podem ser precisamente desenhados para variáveis espacialmente distribuídas e num curto intervalo de tempo podem ser estimados para variáveis de tempo, reduzindo amostragem e custos de análises.

Similarmente, para uma variável sendo autocorrelacionada em um e outro espaço e tempo, quando duas ou mais variáveis são medidas para o mesmo domínio, elas podem ser correlacionadas umas às outras ou cross-correlacionadas duas a duas. Isto permite que valores de uma variável sejam estimados usando os valores medidos de todas as variáveis. Este método de estimativa chamado de cokrigagem é particularmente útil quando uma variável é mais difícil de medir do que outra variável e conseqüentemente tem menos amostras do que outras variáveis com as quais é cross-correlacionada. Por exemplo, na maioria dos casos, observações agrometeorológicas como ar e temperatura da superfície são facilmente obtidas por um e outro motivo ou medidas remotas. Intuitivamente, nós podemos esperar uma cross-correlação entre estas temperaturas e outras variáveis semelhantes como superfície de água contendo um solo nu, evaporação da água, areia, argila e conteúdo de matéria orgânica da superfície do solo. Valores de algumas destas variáveis são mais difíceis de obter do que outras e funções cross-correlação entre elas vão prover modos de estimar valores para tempos não registrados ou localização usando dados disponíveis. Por isso, há aplicações potenciais de

métodos geoestatísticos para análises de variabilidade de observações agronômicas (Vieira et al., 1983).

Zimback (2001) menciona a eficiência da krigagem como um interpolador ao relatar que muitos autores pesquisaram métodos de interpolação, dentre eles o método da krigagem; entretanto, a maioria desses métodos não fornece o algoritmo dos erros associados aos resultados obtidos, o que, efetivamente, é fornecido pelo método geoestatístico da krigagem, segundo um modelo contínuo de variação espacial.

4.1.3 Validação Cruzada

Como o método de ajuste dos modelos de variogramas mais tradicional é o chamado “ajuste a sentimento” (Ribeiro Júnior, 1995), é necessário que se tenha uma maneira para checar se o modelo ajustado é ou não satisfatório. Davis (1987) relata que a validação cruzada é uma útil ferramenta exploratória para ser usada em seus procedimentos de estimação entre um número finito de candidatos. A validação cruzada é usada para achar o melhor modelo entre os competidores. É necessário, portanto, validar o plano de krigagem antes de usá-la para a construção de mapas.

Segundo Myers (1997), a técnica de validação cruzada é bastante simples, pois se remove um dado do conjunto de dados amostrais e, usando-se um estimador e função ponderada relacionada com a distância, estima-se o valor retirado, utilizando-se as amostras remanescentes. Tem-se, portanto, dois valores para o mesmo ponto, o real e o estimado. O erro da estimação pode ser calculado pela diferença entre o valor real e o estimado, sendo repetido para cada local amostrado.

Da mesma maneira, Zamboti (2001) menciona que a validação cruzada consiste em retirar do conjunto de dados um valor de cada vez e estimá-lo, utilizando-se o método de interpolação por krigagem, a partir das observações remanescentes, que será sempre o conjunto de dados original menos uma observação. Retorna-se o valor ao conjunto e retira-se outro valor, repetindo-se o processo para o conjunto todo. Assim para cada observação tem-se o erro de estimação que poderá ser padronizado pelo desvio padrão da estimação.

4.2 Utilização da Geoestatística na pesquisa agronômica do solo e água

A partir dos estudos em mineração, a geoestatística está sendo aplicada a varias áreas da pesquisa agronômica, principalmente relacionadas ao estudo do solo e de fatores que direta ou indiretamente são responsáveis pela sua produção agrícola.

No Brasil, as primeiras publicações datam dos anos 80, como Valente, 1982, sendo que inicialmente, as aplicações eram apenas para questões de geologia mineira; posteriormente estendendo-se para outros campos, e, notadamente, nesses últimos anos, para problemas ligados ao meio ambiente (Landim, 1998).

Devido à grande heterogeneidade dos solos, o conhecimento da variabilidade espacial de suas diversas propriedades é de fundamental importância, visto que se procura diminuir os efeitos da variabilidade dos solos, para que esta não venha afetar a produção das culturas. Com esse propósito, diversos trabalhos têm sido realizados para explorar a variabilidade das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo.

Trangmar et al. (1985) afirmaram que a precisão de exposições que podem ser feitas sobre as propriedades dos solos em qualquer localização depende largamente do grau de variação dentro da área amostrada. À medida que a heterogeneidade dos solos aumenta, a precisão das exposições sobre o desempenho de suas propriedades, comportamentos e uso da terra decresce. Cientistas do solo são limitados a observações restritas de superfícies de solo, necessitando a extrapolação das propriedades do solo de locais onde elas são conhecidas para outros locais, onde elas não são conhecidas. A precisão de tal extrapolação é fortemente influenciada pela variabilidade dos solos, ambos dentro das unidades de amostragem e entre localizações. Similarmente, a probabilidade de transferência das experiências de uso do solo de lugares conhecidos para não conhecidos é fortemente influenciada pela variabilidade espacial e temporal dos solos e outros parâmetros envolvidos. Os autores salientam que o reconhecimento da importância da variabilidade espacial e uso do solo tem levado ao estudo da heterogeneidade do solo, cercada desde uma escala global até mudanças em estrutura e composição química de minerais do solo numa micro-escala.

Reichardt et al. (1986) realizaram um estudo, onde revisam importantes trabalhos da área de Ciência do Solo e compararam a aplicação de técnicas de estatística tradicional e técnicas geoestatísticas. Segundo os autores, no início, a Ciência do Solo utilizou amostras “homogêneas” para análises em laboratório, e a grande maioria dos modelos, teorias e recomendações ainda empregadas presumiam solo homogêneo. Todavia, com o avanço da Ciência do Solo e com o aumento das exigências para a manutenção de altos níveis de produtividade, os modelos simples têm sido insuficientes e a necessidade de considerar a variabilidade em três dimensões, têm-se mostrado cada vez mais presente, em todas as áreas da Ciência do Solo: física, química, fertilidade, conservação, etc. Duas formas

principais de amostragem podem ser utilizadas: a primeira é a coleta de amostras de forma inteiramente casualizada, considerando cada observação como independente das demais, sendo que neste caso, a posição relativa de cada amostragem não é levada em consideração e, como resultado, obtêm-se estimativas de valores médios e estimativas de variâncias. Nesses casos, a variabilidade dos números medidos é descrita pela estimativa de variância e, conseqüentemente, pelo coeficiente de variação. Níveis crescentes de coeficientes de variação indicam classes de maior variabilidade e critérios para a rejeição de local adequado para experimentos e mesmo de resultados obtidos. A segunda forma de coletar amostras ou fazer medidas a campo é de acordo com um plano espacial determinado, sendo a amostragem ou medida regionalizada. Porém, as duas formas de amostragem aqui brevemente descritas têm vantagens e desvantagens. Na verdade, uma complementa a outra. É, porém, importante frisar que a amostragem realizada permite o emprego de qualquer método. Daí, o recente interesse pela nova forma de estudar a variabilidade de solos. Os autores concluem que não se deve encarar a variabilidade espacial dos solos como uma dificuldade, mas como uma característica que se pode medir e tirar proveito dela.

Chien et al. (1997) aplicaram métodos de krigagem e de Cokrigagem, para a estimativa da distribuição espacial das propriedades de solo, tais como: o fósforo disponível, Ca, Mg, Fe, soma de bases (SB), porcentagem de areia, silte e argila. A Soma de Base e a distribuição do tamanho da partícula foram consideradas respectivamente como primárias e variáveis auxiliares para a Cokrigagem. A razão do efeito pepita em relação ao patamar (IDE), no geral para todos os atributos pesquisados, variou entre 57 a 80%, indicando uma correlação espacial moderadamente dependente. As estimativas das distribuições espaciais das propriedades do solo, efetuadas pela krigagem e sob condições decrescentes da

densidade de amostragens, foram correlacionadas significativamente ($P < 0,1\%$). Além disso, com a superamostragem da distribuição do tamanho da partícula, a estimativa global da Soma de Base, qualificada pela Cokrigagem, foi superior àquela da krigagem. Os resultados sugeriram, para a krigagem e a Cokrigagem, que a densidade de amostragem empregada poderia ser diminuída, nas condições de intervalo de amostragem dos levantamentos de grandes escalas, para um valor próximo da metade, que as informações sobre a conduta espacial dos atributos do solo seriam preservadas. Tal informação poderia ser útil na identificação da densidade de amostragem apropriada, para escalas de observações de solo.

Takeda (2000), estudou a variabilidade espacial de atributos físicos do solo, como: macroporosidade (M), microporosidade (m), porosidade total (PT) e densidade do solo (DS); além de atributos químicos, como P, MO, pH, K, Ca, Mg, H+Al, Al, SB, CTC e do V% da associação de solos PVA 10, cultivada sob videira (*Vitis vinifera* L.). Todos os atributos estudados apresentaram dependência espacial, assim classificada: a) forte dependência: P; b) moderada dependência: m, M, PT, DS, MO, pH, H+Al, K, Ca, Mg, SB e CTC, e c) fraca dependência: V%. Em relação ao alcance da dependência espacial, os atributos físicos (m, M, PT e DS) tiveram valores entre 2,75m (m) e 4,32m (DS), enquanto que, nos químicos (H+Al, P, K, pH, Ca, V%, MO, SB, Mg e CTC) variaram entre 1,82m (H+Al) e 5,64 m (CTC).

Mello (2001), objetivando fornecer subsídios para esquemas de amostragem e planejamento de experimentos de preparo do solo, estudou a variabilidade e dependência espacial de atributos químicos (pH, MO, P e K) e da densidade do solo em duas áreas de um Nitossolo Vermelho Distrófico, sendo uma área submetida ao plantio convencional e a outra ao sistema de plantio direto. Observou-se que a maior variabilidade foi

para o fósforo e a menor para o pH. Verificou-se um grau de dependência moderado no sistema de plantio convencional para as seguintes variáveis: pH, matéria orgânica, fósforo e potássio nas profundidades de 0 a 0,20m e 0,20 a 0,40m, com alcance entre 15 e 20m. No sistema de plantio direto observou-se um grau de dependência moderado para as variáveis: densidade do solo na profundidade de 0 a 0,10m; pH, MO e K, nas profundidades de 0 a 0,20m e 0,20 a 0,40m; com alcance de 15m e 20m. Não foi detectada dependência espacial no sistema de plantio convencional para a variável densidade nas profundidades de 0 a 0,10m e 0,10 a 0,20m. Da mesma forma, no sistema de plantio direto para as variáveis: densidade na profundidade de 0,10 a 0,20m, P nas profundidades de 0 a 0,20m e 0,20 a 0,40m e para o K na profundidade de 0 a 0,20m, indicando uma distribuição aleatória, ou seja, independência espacial.

A geoestatística também tem sido usada para análise de diversos parâmetros de solo, que podem ser utilizados para a construção de mapas de diversas propriedades, particularmente importantes para o seu manejo, ou ainda para o estudo de áreas onde às vezes requerem um manejo particular, considerando a aplicação mais econômica de insumos, conservação do solo e, principalmente o aumento da produção com diminuição dos impactos ambientais.

Assim, Yost et al. (1982) utilizaram análises de solo em transeções de solo na Ilha do Haváí para estimar a absorção de P por meio da krigagem, comparando-a com outro método de interpolação denominado “spline”. Concluíram que, o mapa de pontos krigados apresentou correspondência mais próxima com o comportamento do solo conhecido do que com o mapa obtido por interpolação “spline”.

Com relação ao manejo do solo, e mais especificamente, o manejo de pastagens em terrenos íngremes, pode ser oneroso, ao considerarmos certos fatores, como o tempo, dados químicos e equipamentos requeridos. O manejo de tais porções de pastagens requer um conhecimento de modelos espaciais de solo e meio atmosférico. Nesse sentido, Boyer et al. (1996) utilizaram um terreno íngreme de 2,4ha de pastagem não melhorada para determinar a dependência espacial da produção de biomassa sobre as características do solo. Embora a análise de correlação tenha falhado em encontrar muitas relações estatisticamente significativas entre produção de biomassa e características do solo, a análise do cross-variograma de produção de biomassa e características do solo e a análise cross-variograma de produção de biomassa e pH da superfície do solo e alumínio extraível, Mn e P indicam que uma forte dependência espacial existe. Todas essas relações foram usadas para identificação de áreas homogêneas de produção de biomassa e características de solo associadas por krigagem ordinária.

Da mesma maneira, com a finalidade de correlacionar propriedades de solo com produção de culturas, Sanchez (1999) avaliou a variabilidade espacial dos atributos do solo em diferentes superfícies geomórficas e as correlacionou com a produção de café numa região do Alto Paranaíba, MG. A maioria dos atributos de solo na camada de 0-20cm da superfície I apresentou dependência espacial, ao contrário da superfície II, com distribuição aleatória. Na camada de 60-80 cm, a maioria dos atributos do solo apresentaram dependência espacial em ambas as superfícies, refletindo a menor influência do manejo químico. A produção de café apresentou dependência espacial nas duas superfícies, com alcance maior na superfície I, concordando com os atributos básicos do solo. A análise geoestatística dos dados

deste experimento mostrou a importância em determinar os limites entre superfícies geomórficas para representar locais específicos de manejo do solo.

Também Matos (2000) descreveu a estrutura da distribuição espacial de *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith, 1797) na cultura do milho e discutiu o comportamento, ressaltando vantagens e desvantagens dos métodos geoestatísticos em comparação com outros métodos tradicionais de estudo da “dispersão espacial”.

A geoestatística, ao estudar a variabilidade dos solos e relacioná-las com a produção de culturas, também adquire importância quando a agricultura convencional é deixada de lado e parte-se para um razoavelmente novo conceito de produção de culturas, que é a agricultura de precisão. Somente através da geoestatística, consegue-se uma análise mais precisa dos atributos dos solos, bem como sua posterior modelagem espacial para associação com a produção e posterior aplicação em agricultura de precisão.

Outros autores utilizaram a geoestatística para o estudo da variabilidade, dependência espacial e representação das propriedades físicas e químicas dos solos, como: Cambardella et al. (1994), Souza et al. (1997), Carvalho et al. (1998), Salviano et al. (1998), Cavalcante (1999). Especificamente, para os atributos químicos dos solos, outros autores, como Marx (1988), Laslett & McBratney (1990), Cahn et al. (1994), Davis et al. (1995), Cora (1997), Kravchenko & Bullock (1999), Oliveira et al. (1999) e Cassel et al. (2000) e para propriedades físicas dos solos; Puentes et al. (1992), Vieira et al. (1992), Borgelt et al. (1994), Horn et al. (1994) e Ribeiro Jr. (1995) estudaram a variabilidade espacial dos atributos dos solos.

Outros autores têm realizado estudos de mapeamento de características específicas, bem como a variabilidade e dependência espacial desta nos solos, como: medidas

de umidade e temperatura superficiais do solo (Davidoff & Selim, 1988), densidade e condutividade hidráulica dos solos (Bresler et al., 1984; Rogowski & Wolf, 1994; Ciollaro & Romano, 1995; e Gupta et al., 1995), retenção de água (Burden & Selim, 1989; Voltz & Goulard, 1994 e Mallants et al., 1996), resistência à penetração (Moolman & Huyssteen, 1989 e Ley & Laryea, 1994), nível do lençol freático (Aboufirassi & Marino, 1983), resistência e plasticidade (Alli et al., 1990) e processos erosivos (Cremers et al., 1996).

Finalmente alguns autores revisam estudos desenvolvidos, envolvendo variabilidade espacial dos solos. Dessa maneira, Vieira et al. (1983) mencionou que pesquisadores tem trabalhado em problemas de variabilidade desde o início dos anos de 1900 e que muitos cuidadosos experimentos de campo têm sido feitos para determinar os efeitos da variabilidade de solos em vários campos. A partir daí, amostragem tornou-se uma disciplina, sendo que por volta de 1960 muitos livros tem sido escritos sobre teorias de amostragem e eles apresentam esquemas comuns como os tirados ao acaso e amostragem estratificada. Quanto à forma de análise de dados usados, pode-se usar métodos de estatística não espacial como análise de variância, os quais assumem independência entre as amostras e as observações seguem uma distribuição normal. Contudo, um dado conjunto de observações podem ser normalmente distribuídos, apesar de toda a distância de amostragem, podendo existir uma boa autocorrelação, dependendo do processo. Por fim, os autores ressaltam que a autocorrelação requer o uso de uma nova estatística relativamente abordada chamada geoestatística.

Além de sua importância para o estudo de vários atributos do solo, a geoestatística também apresenta consideração merecida, quando se pensa em utilização da água para fins agrícolas. Em agricultura irrigada, torna-se necessário considerar fatores relativos à água, ao solo, à planta e à atmosfera, que apresentam um comportamento variável

no tempo e no espaço, o que exige uma análise estatística adequada para a interpretação de dados. Para esse propósito, pode-se utilizar não somente a análise descritiva geral, como a análise descritiva espacial. A análise geoestatística dos dados servirá para o suporte de decisões, que poderá nortear as técnicas de manejo de uma determinada área.

Com essa finalidade, diversos trabalhos vêm sendo conduzidos para o estudo da variabilidade espacial de vários atributos relacionados com a utilização da água no solo.

Ao passar de estudos de laboratório para experimentação em condições de campo, Nielsen et al. (1973) depararam com o problema da variabilidade espacial. Devido ao enorme número de dados obtidos, os autores verificaram que muitas propriedades do solo obedecem a uma distribuição normal, mas que outras, como a condutividade hidráulica do solo, seguem distribuições assimétricas, geralmente log-normais. Verificaram, ainda, que os modelos teóricos da dinâmica da água descrevem razoavelmente as observações experimentais de campo, mas encontraram grande dificuldade em extrapolar valores médios obtidos para áreas maiores e descrever a hidrologia das grandes regiões: dados de certas propriedades do solo, medidas na posição x_1 , não podiam satisfatoriamente ser aplicados à posição poucos metros distantes.

Nielsen et al. (1973) realizaram um estudo para avaliar a variabilidade espacial de medidas de campo de propriedades de água-solo. Consideraram que como a água é o meio no qual ocorrem transformações biológicas e químicas de nitrogênio (N), nas quais suas diferentes formas móveis são transportadas no perfil do solo. Para prever o comportamento do nitrogênio em solo, torna-se necessário primeiro prever a retenção de água e seu movimento. Nesse sentido, estudos de movimento de água e nitrogênio foram feitos de

maneira mais complexa devido às características de heterogeneidade e variabilidade comuns para a maioria dos solos. O experimento teve três objetivos: o primeiro foi avaliar o tipo e a magnitude da variação espacial encontrada sobre um campo considerado geralmente uniforme com relação à maioria das práticas culturais; o segundo objetivo do trabalho foi avaliar equações adequadas de água-solo para prever o movimento sob condições de campo e o objetivo final do trabalho foi determinar se alguma relação útil poderia ser desenvolvida entre análises de tamanhos de partículas medidas em laboratório, densidade em volume e curvas de solo características para estudar o movimento de água sob condições de campo. De modo geral, finalmente, de todo esse estudo, os autores concluíram que:

- variações nos conteúdos de água são normalmente distribuídos em profundidade e com distâncias horizontais por todo o solo, enquanto valores de condutividade hidráulica e difusividade de água-solo são log-normalmente distribuídas;
- uma simples equação pode ser usada para prever o fluxo de água deixando qualquer profundidade desejada de solo como uma função de infiltração em função do tempo. A equação requer somente que um estado regular da condutividade hidráulica e a inclinação da curva da condutividade hidráulica do conteúdo de água próximo da saturação deva ser conhecida;
- métodos disponíveis na literatura para prever a condutividade hidráulica x relações de conteúdo água-solo de curvas características de água-solo são adequadas para prever valores de campo;
- métodos simplificados para medidas de valores de campo da condutividade hidráulica ou difusividade água-solo, usando simplesmente um único, ou preferivelmente, dois tensiômetros

e uma confiável curva característica de água-solo, são suficientemente precisas para caracterizar condições de campo;

- mesmo áreas de solo aparentemente uniformes, manifestam grandes variações nos valores de condutividade hidráulica. Variações na textura, densidade de volume e conteúdo de água são muito menores. Para uma dada localização, métodos de medidas de conteúdo de água, condutividade hidráulica e gradientes hidráulicos vão produzir valores que são muito mais precisos do que requeridos para caracterizar um campo total por causa da heterogeneidade do solo. Assim, a habilidade dos autores em fazer predições sob grandes áreas em um só lote, pôde estender-se de bom para não satisfatório, dependendo das predições particulares de parâmetros de interesse;
- A falta de correlação entre parâmetros de água-solo e densidade em volume de solo ou tamanho de partículas implicam que medidas feitas historicamente durante observações de solo tem restringido o valor para prever o movimento de água no solo, bem como retenção;
- As mais importantes medidas de laboratório para prever o comportamento da água no solo numa área são a curva característica e um valor de estado estável de condutividade hidráulica. Essas medidas provêm informações amplas que aproximadamente predizem o comportamento da água no solo sob condições de campo.

A variabilidade espacial do processo de infiltração de água em solos foi abordada por Sisson & Wierenga (1981) através da medição de constantes taxas de infiltração num campo com infiltrômetros de 5cm, 25cm e 127cm de diâmetro interno. As taxas de infiltração foram encontradas lognormalmente distribuídas para todos os tamanhos de anéis e autocorrelacionada para tamanho de anel de 5cm. Recomendações de amostragem baseadas nos resultados obtidas por Sisson & Wierenga, incluem uma recomendação para

amostragem em espaço e amostragem repetida em tempo para detectar efeitos de tratamento. Para amostragem de campo para algum atributo, as amostras devem ser de localizações amplamente dispersas, enquanto que para amostragem em tempos repetidos, o oposto é verdadeiro. Para amostragem de solos sob vários tratamentos de irrigação para reconstrução de sais, por exemplo, é menos interessante a redução da variabilidade espacial do que a redução da variabilidade temporal inexplicada. Para obter isto, várias amostras dispersas devem ser compostas e a exata localização de cada uma, deve ser permanentemente marcada. No próximo período de amostragem, deve-se amostrar o mais perto possível dos pontos originais e assim assegurar efeitos de variabilidade espacial para um mínimo.

Sales (1992) estudou a variabilidade espacial da velocidade de infiltração básica associada às camadas superficial e sub-superficial de dois solos, sendo uma área de Latossolo Roxo e outra de Podzólico Vermelho Amarelo. Para cada ponto amostral foi determinado o valor da velocidade de infiltração básica através do método do infiltrômetro de anéis concêntricos, além da condutividade hidráulica saturada, densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e volume total de poros, bem como a determinação da análise granulométrica, densidade de partículas e análise química. Para a análise dos dados, utilizou-se a estatística não espacial (correlação e regressão) e a geoestatística. Na análise, as propriedades que apresentaram uma maior variação foram a condutividade hidráulica saturada e a velocidade de infiltração básica, pois seguiram uma distribuição de frequência log-normal ao nível de 5% de probabilidade. As propriedades físicas da camada de 60-80cm do Podzólico Vermelho-Amarelo apresentaram uma melhor associação com a velocidade de infiltração básica, que pode ser verificado pelos maiores coeficientes de correlação, enquanto que para Latossolo Roxo, isso foi verificado na camada de 0-20cm. Foram estabelecidas relações

funcionais em ambos os solos e pode-se observar que a condutividade hidráulica saturada constitui-se na melhor propriedade para estimar a velocidade de infiltração básica, pois a velocidade de infiltração básica correlacionou-se positivamente com a condutividade hidráulica saturada, volume total de poros, macroporos e negativamente com a densidade do solo. O modelo linear foi ajustado aos variogramas experimentais da velocidade de infiltração básica e condutividade hidráulica saturada (60-80cm) do Podzólico Vermelho Amarelo e observou-se anisotropia geométrica, enquanto que no Latossolo Roxo não se observou dependência espacial. Foram comparados os números de amostras necessárias para estimar a velocidade de infiltração básica e condutividade hidráulica saturada através da geoestatística e da estatística clássica e pode-se constatar que o número de amostras determinadas pela geoestatística foi bem menor que o número de amostras da estatística clássica.

Nielsen et al. (1983) consideram que o desenvolvimento da melhor metodologia de amostragem para camadas do solo é um desafio para a comunidade mundial do solo e para cientistas geofísicos. Incontáveis gerações humanas têm manejado o solo, com o objetivo principal de produção de alimentos para satisfazer as necessidades dos habitantes da Terra. No passado, foram levadas em consideração as medidas anuais da produtividade das colheitas, deixando de lado medições abaixo da superfície do solo, medições estas de caráter importantíssimo para indicar as conseqüências a longo prazo do monitoramento de recursos de solo e água dos dias atuais. Mesmo considerando os procedimentos da estatística tradicionais como inestimáveis, os autores salientaram a importância de expandir estruturas conceituais que incluem a consideração de análises estatísticas normalmente não incluídas em Ciências Agrárias. Acreditam que uma expansão nessa área é totalmente justificável, quando o que se deseja é examinar a mudança de qualidade dos solos, assim como o movimento da água.

Assim concluem que deve ser dada mais atenção ao desenvolvimento de técnicas para um melhor monitoramento de propriedades de água-solo.

Reichardt et al. (1984) revelaram como a variabilidade espacial da umidade do solo pode ser utilizada com vantagem para estudar a influência da umidade sobre outros parâmetros de uma cultura agrícola, como a absorção de nutrientes, produtividade e fixação biológica do nitrogênio. A partir da variabilidade natural do solo, o correlograma cruzado é utilizado para mostrar a correlação entre parâmetros. Estes trabalhos estão entre os primeiros que mostram a variabilidade espacial de parâmetros de planta, como uma consequência da variabilidade do solo.

Folegatti (1996) conduziu um trabalho no campo experimental da Universidade da Califórnia – Davis, com o objetivo de estudar a estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade do solo nas profundidades de 0,15 e 0,30m, e do armazenamento médio de água em 0,40m de profundidade de solo. A umidade do solo foi determinada através da sonda de nêutrons. As análises mostraram que a umidade do solo nas duas profundidades apresenta estabilidade temporal, sendo possível desta forma identificar pontos ao longo da transeção que, se amostrados, fornecem valores de umidade que constituem boas estimativas da média de todos os dados da transeção. Observou-se que os variogramas para umidade do solo nas duas profundidades apresentaram estrutura de variação no espaço quando o solo estava úmido, indicando que esta propriedade não ocorre aleatoriamente em um alcance de 10m. O armazenamento de água no solo, também apresentou estrutura de variação no espaço com mesmo alcance, e com patamar crescente à medida que o solo secava. Estes resultados evidenciaram que a estrutura de variação destas propriedades

deve ser considerada em amostragens futuras, mesmo que se tenha constatado a estabilidade temporal.

Outros estudos referentes à dinâmica da água no solo têm utilizado a geoestatística e, mais especificamente a técnica de krigagem para verificar a dependência espacial entre os vários atributos de água e solo, objetivando conciliar o comportamento da planta em relação a um determinado sistema de irrigação.

Tabor et al. (1984), utilizaram a geoestatística através de variogramas e krigagem para determinar a variabilidade espacial de nitratos em pecíolos de algodão (Gossypium hirsutum L.) irrigado. Nitratos em pecíolos mostrou-se ser espacialmente dependente em sete campos comerciais. Essa dependência espacial pode classificar-se de insignificante, onde a variabilidade inerente da amostragem e análise é relativamente grande para fortemente dependente. Os dados de uma malha de 360 em 360m indicaram uma anisotropia de dependência espacial. Os modelos de isotropia e anisotropia para a malha de amostragem de campo foram comparados, usando a técnica “jack-knifing”. Os variogramas e mapas krigados de nitratos em pecíolos sugeriram uma forte influência devido a práticas culturais, como a direção das fileiras e irrigação.

Brooker & Winchester (1995) realizaram um estudo geoestatístico de dados de solo de um vinhedo irrigado, perto de Waikerie, sul da Austrália. Consideraram a necessidade da medição da capacidade de retenção de água pelo solo quando se deseja calcular suprimentos efetivos de água para irrigação. Consideraram também que, medidas de campo da profundidade e textura de cada camada de solo num perfil permitiam o cálculo da água prontamente disponível num local. Assim, a variação espacial da água prontamente disponível foi caracterizada por seu respectivo variograma; função usada em Geoestatística para

determinar o valor médio de variáveis sobre áreas irrigadas pela abertura de válvulas de irrigação. A precisão de tais estimativas foi realizada através da krigagem. Um estudo de caso aplicado para o vinhedo existente lidou com a zona radicular de água prontamente disponível e profundidade do solo. A propriedade foi amostrada com uma malha de 75 x 75m, sendo que as áreas de válvulas de irrigação eram tipicamente de 1,3ha. Observaram que ocorreu uma redução de 50% nos intervalos de confiança para as estimativas, quando as válvulas de irrigação foram estimadas por krigagem ao se comparar com estimativas obtidas usando uma média simples de amostras contidas dentro da área. Foi interessante a anisotropia observada nos variogramas, sendo que a variação na direção N-S foi muito mais rápida do que na direção E-W. Este fator foi correntemente incorporado dentro do desenho retangular de áreas de válvulas de irrigação; concluindo, portanto que esse fenômeno também deve influenciar o desenho da amostragem.

Visando a análise da variação regional das necessidades de água de irrigação aplicada para produção de batata (*Solanum tuberosum* L.) em Trás-os-Montes (Portugal), Sousa & Pereira (1999) coletaram dados de 106 estações de precipitações e de 8 estações climáticas, com a finalidade de utilizá-los numa simulação de um modelo de programa de irrigação para estimar as necessidades de água da rede de irrigação para a produção de batata. O modelo de simulação foi primeiramente validado usando um experimento de campo, o que possibilitou a coleta de dados de produção requeridos para o uso nas simulações. A evapotranspiração de referência foi estimada usando o Método FAO Penman-Monteith. O modelo foi aplicado para todas as 106 localizações, cada uma com um conjunto de dados da necessidade de água das redes de irrigação por um período de 19 anos, sendo que estes dados foram tratados como uma variável regionalizada. Os respectivos

variogramas foram computados e foi utilizado o método da krigagem para estimar a distribuição espacial das necessidades de água na região. Para o desenho das linhas de contorno desta variável regionalizada foi utilizado um sistema SIG (Sistema de Informação Geográfica). Os resultados mostraram que a seleção do modelo foi apropriada; sendo que a validação de campo do modelo indicou uma precisão apropriada no que diz respeito à simulação dos conteúdos de água no solo e produção de batata na região. A adoção do procedimento de krigagem para determinação da distribuição espacial das necessidades de redes de irrigação da batata também se mostrou apropriada. De fato, as estimativas de erro foram por volta de 5%, enquanto isolinhas das necessidades da rede de irrigação foram bem explicadas pela influência do auxílio de ambos, precipitação e evapotranspiração. Os resultados encorajaram o uso dessa técnica para desenhar mapas com informações mais detalhadas relativas às necessidades mensais de irrigação, que poderiam ser usadas para aconselhar melhor os agricultores nas decisões de programação de irrigações. Os resultados permitem desenvolvimentos adicionais na programação de práticas adicionais de irrigação na forma de desenvolvimento de calendários de irrigação ou tabelas de irrigação adotadas para a variação regional das necessidades de irrigação em culturas.

Sabe-se que para uma boa produção agrícola, bem como o estabelecimento de um programa de irrigação é de fundamental importância o balanço de umidade do solo, que depende por sua vez, da precipitação pluviométrica. Nesse sentido, Zamboti (2001), utilizando dados de observações da precipitação pluviométrica, estudou a existência, a estrutura e a modelagem da dependência espacial, bem como a interpolação de valores para locais não amostrados e construção de mapas de contornos para a precipitação pluviométrica e comparou esses mapas com as respectivas cartas geográficas da precipitação

pluviométrica no Paraná. Ao comparar as modelagens utilizadas para a obtenção dos mapas no referido trabalho e das cartas climáticas do Paraná, o autor concluiu que o trabalho apresentou melhoria das estimativas.

Brooker (2001) investigou a variabilidade de subáreas de um vinhedo que foi irrigado por diferentes sistemas de molhamento em tempos diferentes, com o objetivo de avaliar a influência da variabilidade das características dos solos no desenho de sistemas de irrigação, bem como no seu manejo. Para isso, apresentou um estudo de caso, no qual áreas de válvulas de irrigação de aproximadamente 1,3ha foram irrigadas por aspersores superficiais que cobriram uma área maior (24 x 22m), sendo que devido a altos níveis de salinidade do rio, áreas menores (3 x 3m) sofreram mudanças para irrigação sub-superficial, que irrigavam a base das plantas. Utilizou-se a geoestatística, na qual a variabilidade espacial do solo foi primeiramente determinada pelo cálculo do variograma. Em ambos os casos, a variação de áreas molhadas dentro das áreas irrigadas foi similar. O pequeno aumento ocorrido na instalação do sistema sub-superficial, não foi suficiente para justificar a remodelagem de áreas de válvulas de irrigação. Entretanto, a variabilidade das áreas de válvulas de irrigação dentro de um vinhedo mostrou um coeficiente de variação aproximadamente duas vezes deste, o que reafirma a necessidade de tratar áreas de válvulas separadamente. O mapa da zona radicular traçado no prévio estudo foi útil na definição da quantidade de água para ser provido para uma área. O autor concluiu que as relações entre áreas de válvulas de irrigação com valores similares justificavam o deslocamento da irrigação para o manejo do sistema. Entretanto, a análise geoestatística mostrou que variação extra não era considerável e não havia, portanto, necessidade de redesenhar as áreas de válvulas de irrigação.

Um fator que merece consideração quando se pensa em manejo de irrigação é a salinidade do solo. A salinidade é uma propriedade que apresenta variabilidade espacial e temporal, requerendo, portanto, processos adequados de amostragens, determinações e análises dos dados, que permitam obter informações de seu comportamento. O monitoramento da salinidade é de fundamental importância para orientar as práticas de manejo da irrigação e as técnicas de recuperação de áreas afetadas.

A utilização de recursos da estatística clássica e da geoestatística se complementam na análise e interpretação dos dados de salinidade. Porém somente através da geoestatística é possível caracterizar a estrutura da dependência espacial entre os parâmetros que definem a salinidade do solo. Uma vez detectada a dependência espacial entre as observações, o processo de krigagem permite estimar valores em locais não amostrados, sem tendência e com variância mínima, assegurando a melhor qualidade das estimativas. Por outro lado, caso as observações sejam independentes espacialmente, os procedimentos clássicos da estatística podem ser utilizados para avaliar a distribuição de probabilidade e os momentos estatísticos dos parâmetros estudados. O mapeamento pelo processo de krigagem é de grande importância para orientação do manejo e controle da salinidade, como também o planejamento de estudos quanto à resposta de cultivos em diferentes setores. O mapeamento permite uma visualização espacial da salinidade da área de interesse, o que constitui um aspecto de inquestionável importância no manejo da agricultura irrigada em zonas áridas e semi-áridas. A análise de dados de salinidade deve ser realizada de modo a permitir a identificação de áreas problema e o monitoramento de variações temporais, tornando possível planejar o estudo de recuperação, definir estratégias de manejo, bem como identificar que fatores estão contribuindo para o problema (Queiroz et al., 1997).

Outros estudos abordaram ainda aspectos relacionados à salinidade, como: drenagem em solos salinos (Agrawal et al., 1995), salinidade do lençol freático (Hooda et al., 1986 e Samra et al., 1989).

Além da aplicação da geoestatística em estudos de irrigação podemos encontrar também suas inferências em drenagem de solos. Assim, Utset & Castellanos (1999) estudaram efeitos da drenagem na variabilidade espacial da condutividade elétrica (CE) num Vertisol. Observaram que ambos valores médios; de condutividade elétrica (CE) e coeficiente de variação (CV); foram reduzidos após a drenagem. Os histogramas de frequência mostraram que a condutividade elétrica se ajustou à distribuição lognormal antes da drenagem, enquanto pareceu ser normalmente distribuído após o início da drenagem. A bimodalidade encontrada nos histogramas antes da drenagem não foi observada depois dela. A estrutura espacial da condutividade elétrica do solo foi mais forte a 0-20 cm antes da drenagem e foi mais fraca a profundidades maiores. Contudo, o variograma a 40-60cm depois da drenagem, mostrou uma estrutura espacial mais notável. A variabilidade espacial da condutividade elétrica mostrou anisotropia antes da drenagem, que foi relacionada à topografia. Entretanto, variogramas direcionais depois da drenagem não mostraram tal anisotropia. Concluíram que a drenagem não somente reduziu os valores de condutividade elétrica, mas também mudou notavelmente a variabilidade espacial da condutividade elétrica.

Há também considerações da utilização da geoestatística para fins de experimentação em cultivo protegido. Cataneo (1997) relata que o ambiente protegido tem como principal característica em relação ao campo, o de realçar os efeitos de variações de fatores climáticos e de seus correlatos. Assim, é que, por exemplo, devido às diferentes proximidades das paredes da casa de vegetação, túnel ou outro ambiente protegido, algumas

das parcelas poderão estar expostas a condições de temperaturas mais elevadas que as outras pela manhã, sendo que à tarde poderá ocorrer o contrário. Outras variações entre as parcelas poderão ocorrer, como trocas gasosas, umidade, evapotranspiração, possibilidade de desenvolvimento de doenças, etc. Esses exemplos mostram a presença de variabilidade espacial nas parcelas. A variabilidade inviabiliza as aplicações das análises de variâncias comuns, na maior parte das vezes com parcelas inteiramente casualizadas ou em blocos ao acaso, pois a pressuposição de independência é violada. Mesmo em casos onde os fatores externos possam ser melhor controlados, não se pode garantir a homogeneidade das parcelas, principalmente pelo fato de se utilizar pequeno número de repetições.

Delineamentos experimentais elaborados, como por exemplo, os “lattice”, podem corrigir os efeitos de variabilidade espacial. Mas, raramente são utilizados, pois há preferência por delineamentos comuns em parcelas, que levam muitas vezes a baixas eficiências devidas, principalmente, às variabilidades espaciais não captadas. Aproximações de baixo custo, que não requeiram delineamentos especiais e análises complicadas, como os métodos do vizinho mais próximo (“Nearest Neighbour”) e os de geoestatística, que consideram a posição da parcela, podem corrigir esses problemas e são mais interessantes que o desenvolvimento de métodos alternativos (Ball et al., em 1993, citados por Cataneo, 1997).

Além de inúmeras aplicações, muitos autores fazem um retrospecto de todos os estudos desenvolvidos com a finalidade de definir variabilidade dos solos e suas implicações. Com esse propósito, Burrough (1993) revisou o progresso que tem sido feito nos últimos 20 anos em nossa habilidade para registrar, analisar, entender e usar informações sobre a variação espacial do solo. Nesse trabalho, aborda o assunto com vários títulos, tais como: modelos conceituais de variabilidade espacial de solos; avanços técnicos para registro e

armazenamento de dados de levantamentos de solos, classificação numérica, classificação contínua e variabilidade de solo, métodos geoestatísticos para descrição da variabilidade do solo, enfim, múltiplas escalas que abordam a variabilidade do solo: fractais, modelos espaciais e variabilidade do solo e caos. Informações sobre a variabilidade espacial são essenciais ao estudar modelagem de formação do solo e seus processos em desenvolvimento e mapas de solo convencional vem sendo cada vez mais suportados com informações sobre a variabilidade de unidades mapeadas e controle de qualidade na observação dos dados do solo está se tornando rotina. Mas, o conhecimento sobre a variabilidade do solo é ainda disperso e mal organizado. Segundo o autor, há uma necessidade em organizar e sistematizar nossos conhecimentos em variabilidade de solo.

Landim (1998) relatou que os maiores problemas enfocados pela geoestatística são, portanto:

- o entendimento, por meio de análise matemática, da gênese e das leis naturais que governam fenômenos interpretados como regionais;
- a estimação das variáveis regionais, ou algumas de suas características espaciais, usando informações e relações a partir de um conjunto discreto de amostras;
- a avaliação dos erros de estimação, para estabelecer o grau de segurança em previsões e o padrão ótimo de amostragem que assegure que um erro máximo de estimação não será excedido.

4.3 Irrigação por gotejamento

O sistema de irrigação por gotejamento surgiu em 1940 na Inglaterra, onde era utilizado na irrigação e fertilização de cultivo em estufas de vidro. Porém, sua utilização no campo se deu por volta de 1950, em Israel. A partir de 1960, o gotejamento sofreu grande desenvolvimento, sendo utilizado como prática rotineira na Austrália, Europa, Israel, México, República Sul Africana e Estados Unidos (Karmeli & Keller, 1975; citados por Leite Júnior, 2000).

Existem diferentes sistemas de irrigação, cada qual apresentando características próprias, com custos variáveis, vantagens e desvantagens. Dependendo da forma com que a água é aplicada às plantas, os sistemas podem ser agrupados em superficiais, subsuperficiais, aspersão e microirrigação. Microirrigação compreende sistemas como gotejamento, xiquexique, microaspersão e borbulhador (“bubbler”), nos quais a água é, em geral, aplicada ao solo, próximo à planta, em baixo volume e alta frequência (Marouelli & Silva, 1998).

O termo microirrigação, que desde meados dos anos 80 começou a substituir a denominação irrigação localizada, compreende os sistemas de irrigação por gotejamento, microaspersão e similares. Os sistemas de microirrigação atualmente são utilizados para a aplicação conjunta de água e fertilizantes às culturas. Esse processo combinado, conhecido por fertirrigação, propicia elevado grau de controle e completa automatização do sistema, com maior economia e eficiência no consumo de água, energia, fertilizantes e mão-de-obra. A principal desvantagem é o perigo de entupimento de emissores,

que pode ser minimizado pelo uso correto de fertilizantes e tratamento de água através de filtração, correção de pH, etc. (Silva & Marouelli, 1998).

Goldberg, Gornat e Rimon, 1976, citados por Olitta (1981), salientam muito bem que a irrigação por gotejo não é somente outro método de aplicar água às plantas, mas uma conceituação agrônômica para a condução das culturas, sob condições altamente controladas de umidade do solo, fertilização, salinidade, etc., que têm um efeito significativo na resposta das plantas, época de colheita e qualidade da produção. A irrigação por gotejo poderia ser definida como a aplicação de água filtrada e fertilizantes, a uma baixa taxa, através de um extenso sistema de canalizações e gotejadores. A filtração da água é necessária para evitar entupimentos dos gotejadores e, quanto ao uso de fertilizantes dissolvidos na água de irrigação, já que constitui parte integrante do método. Convém salientar que as particularidades do equipamento utilizado neste método de irrigação permitem a aplicação de água às plantas em qualquer quantidade e em qualquer intervalo, com igual facilidade.

A irrigação por gotejamento compreende os sistemas de irrigação nos quais a água é aplicada ao solo, diretamente sobre a região radicular, em pequenas intensidades (1,0 a 10,0 L.h⁻¹), porém com alta frequência (turno de um a quatro dias), de modo que mantenha a umidade do solo na zona radicular próxima à capacidade de campo. Para isso, a aplicação da água é feita por meio de tubos perfurados com orifícios de diâmetros reduzidos ou por meio de pequenas peças denominadas gotejadores, conectadas em tubulações flexíveis de polietileno, trabalhando a pressões variando entre 0,5 e 2,5 atmosferas, sendo que a pressão de serviço da maioria dos tipos de gotejadores está em torno de uma atmosfera (Bernardo, em 1995 e Gomes, em 1998, citados por Antunes, 2001).

Por outro lado, Silva & Marouelli (1998) relatam que a água em microirrigação pode ser aplicada de forma contínua ou intermitente, sendo a frequência dependente das características do solo, do clima e da cultura. A frequência de aplicação da água deve ser definida em função do período (geralmente de um dia) para o qual foram determinadas as necessidades hídricas, de modo a não haver déficit ou aplicações excessivas. No caso de solos muito arenosos e de alta demanda evaporativa da atmosfera, o volume de água a aplicar pode ser parcelado várias vezes durante o dia para evitar estresse para as plantas. Em microirrigação por gotejamento superficial é importante que o bulbo molhado seja o mais hemisférico (metade de uma esfera) possível, o que significa que a água e fertilizantes poderão ser melhor aproveitados pelas raízes das plantas, evitando ainda problemas de lixiviação de nutrientes. Mesmo em solos arenosos isto é possível de ser conseguido através de aplicações de baixos volumes, em regimes de alta frequência.

Marouelli & Silva (1998) ressaltam que o sistema de irrigação por gotejamento bem como outros sistemas de irrigação (aspersão convencional, pivô central com reguladores de pressão, microaspersão) podem ser utilizados para terrenos com declividade acentuada e/ou superfícies irregulares; salientando também que a microirrigação pode ser usada em declives de até 60%, principalmente após o advento de gotejadores autocompensantes, ventosas e reguladores de pressão.

A irrigação por gotejamento supõe uma melhoria tecnológica importante, que contribuirá, portanto, a uma maior produtividade. Permite uma troca profunda dentro dos sistemas de aplicação de água ao solo que incidirá também nas práticas culturais a realizar, desde o ponto que pode se considerar como uma nova técnica de produção agrícola. Uma das características desse sistema é que a água que se aplica ao solo desde uma fonte que

pode considerar-se fixa, se infiltra no terreno e se move na direção horizontal e vertical. Nisto difere substancialmente da irrigação tradicional, nas quais se predominam as forças de gravidade e, portanto, o movimento vertical. Também difere no movimento dos sais. Ao considerar-se o esquema do movimento da água, a parte umedecida e devido à sua forma, se chama bulbo. Em terrenos argilosos será largo, enquanto que para arenosos, estreito e profundo. Não se molha todo o solo, somente parte do mesmo, que varia com as características do solo, com a vazão do gotejador e com o tempo de aplicação. É nesta parte úmida que a planta concentrará suas raízes e dela se alimentará (San Juan, 1985).

Também Bernardo (1995) salienta que a aplicação d'água ao solo, na irrigação por gotejamento, é sob a forma de “ponto forte”, ficando a superfície do solo com uma área molhada com forma circular e o volume do solo molhado com forma de um bulbo (cebola). Quando os pontos de gotejamento são próximos uns dos outros, forma-se uma faixa molhada contínua. Sendo assim, somente uma pequena porção da superfície do solo será molhada, o que diminui em muito a evaporação direta da água do solo para a atmosfera, quando comparada com a irrigação por aspersão e superfície.

Soares et al. (1998) afirmam que sob irrigação por gotejamento, pode-se destacar a vazão do emissor com fluxos variável ou constante, cujos valores podem variar desde 1,0 a 4,0 L.h⁻¹; os tipos de emissor contendo mecanismos autocompensantes e/ou autolimpantes ou não, estrudados diretamente na tubulação ou não, entre outras características. Salienta também que o bulbo molhado é um parâmetro de fundamental importância para a escolha do sistema de irrigação por gotejamento, uma vez que influi diretamente no dimensionamento do sistema e no manejo da água.

Ainda Marouelli & Silva (1998) citam o gotejamento como o sistema preferido em cultivo protegido de hortaliças, pelo fato de possibilitar total automação do sistema, controle eficiente da água e uso intensivo da fertirrigação. Da mesma maneira, Bernardo (1995) ressalta que em razão de concentrar o sistema radicular da cultura junto ao “bulbo” molhado, o que facilita a aplicação do adubo por cobertura, a irrigação por gotejamento permite a fertirrigação, sendo a maior eficiência da adubação uma das vantagens do método. Mais além, Bernardo (1995) relata outras vantagens do método de irrigação por gotejamento: maior eficiência no uso da água, maior produtividade das culturas, maior eficiência no controle fitossanitário, não interferência nos tratos culturais, adaptação a diferentes tipos de solos e topografia, possibilidade de utilização com água salina ou em solos salinos, economia de mão-de-obra; porém como desvantagens: entupimento dos gotejadores, devido ao pequeno diâmetro de saída e a distribuição do sistema radicular junto à região do “bulbo molhado”, o que diminui a estabilidade das árvores frutíferas, podendo ocorrer tombamento destas árvores em regiões sujeitas a ventos com maior intensidade.

Christofidis (2001) observa a evolução das áreas irrigadas pelos diferentes métodos de irrigação no Brasil, no período de 1996-1999, inclusive nas regiões e nos estados, e mencionou que há uma clara evolução nas áreas sob irrigação por aspersão e irrigação localizada. Fez também uma estimativa que nos próximos dez anos não só as novas áreas irrigadas utilizarão predominantemente o método de irrigação localizada, como também haverá uma reconversão de 40% das áreas atuais sob irrigação por superfície e 30% das áreas irrigadas sob aspersão, para a irrigação localizada, ou seja, gotejamento e microaspersão.

4.4 Umidade do solo

Bernardo (1995) considera que um dos métodos comumente usados, para obtenção da umidade do solo aproximado do valor de campo da capacidade de campo (C_c) é o método da curva de tensão (curva característica). A tensão considerada como equivalente à C_c é de 1/10 de atmosfera, para solos de textura grossa e de 1/3 de atmosfera para solos de textura fina, sendo que a tensão geralmente usada é de 1/3 de atmosfera, para qualquer tipo de solo. Esta curva de tensão é determinada em laboratório com “panela” e “membrana” de pressão ou funil de “Bukner”, podendo ser usados solos sem estrutura ou com estrutura natural, sendo este último mais trabalhoso, porém mais preciso.

Entretanto, Reichardt (1988) analisou o conceito de capacidade de campo do ponto de vista teórico e discutiu-o em relação a dados de drenagem interna de um solo considerado homogêneo (latossolo) e outro heterogêneo (terra roxa estruturada). Foi dada ênfase ao fato de ser a capacidade de campo o resultado de um comportamento dinâmico da água no solo e não uma característica intrínseca de sua matriz. Considerou que o principal fator da redução do fluxo de drenagem é a condutividade hidráulica do solo e não o gradiente de potencial, sendo que o fluxo de drenagem decresce rapidamente com o tempo, mas, praticamente, nunca cessa, o que torna muito subjetiva a escolha do instante para a determinação da capacidade de campo. Cada tempo escolhido leva a um valor diferente dessa capacidade, cujos métodos de determinação em amostras de laboratório não têm suporte teórico; e seus resultados, porém, podem ser úteis para efeito prático. Nesses casos, considerou que o critério clássico do potencial matricial de -33 kPa ($-1/3$ atm) deve ser levado para potenciais maiores, da ordem de -10 a -6 kPa ($-1/10$ a $-6/100$ atm).

Mais além, Reichardt (1990) relacionou os componentes do potencial da água:

- componente gravitacional (Ψ_g): tem valor zero no plano de referência, é positiva acima dele e negativa abaixo dele. O plano de referência é o estado padrão para gravidade e o plano mais comumente escolhido é a superfície do solo;
- componente de pressão (Ψ_p): a componente de pressão é medida em relação a uma condição padrão, tomada como sendo a da água submetida à pressão atmosférica local e, nestas condições, assume-se $\Psi_p = 0$. Nesta componente, considera-se somente a pressão manométrica positivas, isto é, acima da pressão atmosférica;
- componente matricial (Ψ_m): esta componente se refere aos estados de energia de água devidos à sua interação com as partículas sólidas do solo, também chamadas de matrizes do solo. Esta interação se refere a fenômenos de capilaridade e adsorção e eles conferem à água estados de energia menores do que o estado da água “livre” à pressão atmosférica e, como para este último é atribuído o valor zero (estado padrão), a componente matricial Ψ_m será sempre negativa. Para um solo saturado, no qual todos os poros estão cheios de água, a adsorção é nula e nestas condições, a componente matricial é nula ($\Psi_m = 0$). Para valores de θ relativamente altos (solos úmidos), a capilaridade é o principal fenômeno que determina Ψ_m . Para valores de θ relativamente baixos (solos secos), a água apresenta-se na forma de filmes, cobrindo a partículas de solo e o fenômeno de capilaridade deixa de ter importância. Nesta condição, a adsorção é importantíssima e devido a ela, Ψ_m assume valores bem negativos. A componente matricial Ψ_m de um solo é, portanto, função de sua umidade θ . Na prática, Ψ_m é medido, não calculado. Existem vários equipamentos, tais como tensiômetros, funis de placa

porosa, câmara de pressão de Richards, que medem Ψ_m . Estes equipamentos baseiam-se na aplicação de uma tensão $-h$ ou uma pressão $+h$ ao solo, resultando uma saída de água do solo. Quanto maior o valor de h (em termos absolutos) mais água sai. Para cada valor de h , no equilíbrio, existe um valor de θ no solo. Como h é o próprio Ψ_m , variando-se a pressão ou a tensão e medindo-se os correspondentes valores de θ , torna-se fácil construir uma curva de retenção de água. Como o potencial matricial varia de ponto a ponto no solo e também em função do tempo, ele precisa ser determinado para cada situação. Uma forma de determinação é o uso da curva de retenção de água do solo; outra forma comum, e direta, é pelo uso do tensiômetro. O tensiômetro é um instrumento de campo utilizado para medir diretamente Ψ_m . Ele consiste de uma cápsula porosa de cerâmica conectada a um manômetro através de um tubo de plástico. A dimensão dos poros da cápsula é tal que nem com 1 atm de pressão (ou sucção) eles podem ser esvaziados. Quando a cápsula entra em contato com o solo, a água do tensiômetro (que é hermeticamente selado) entra em contato com a água do solo e o equilíbrio tende a estabelecer-se. Inicialmente, isto é, antes de colocar o instrumento em contato com o solo, sua água está à pressão atmosférica e, como o estado padrão é definido pela água à pressão atmosférica, $\Psi_m = 0$. A água do solo, estando sob tensão, exerce uma sucção sobre o instrumento e dele retira certa quantidade de água causando a queda de sua pressão interna. Como o instrumento é vedado, a coluna de mercúrio h do manômetro cresce, indicando a tensão interna da água. Estabelecido o equilíbrio, o potencial da água dentro do tensiômetro é igual ao potencial da água no solo e assim, h é uma medida direta de Ψ_m .

$$Y_m = -(13,6 h - h - h_1 - h_2) \text{ cm } H_2O \quad \text{ou} \quad Y_m = -12,6 h + h_1 + h_2 \quad (18)$$

onde:

h = leitura em cm de Hg (mercúrio);

h_1 = altura do nível de Hg em relação ao solo;

h_2 = profundidade de medida.

O fator 13,6 é a densidade do mercúrio que aparece para transformar a leitura h (dada em cm de Hg) em cm H_2O . Na equação (18), nota-se que de 13,6 h são descontadas as alturas h , h_1 e h_2 e isto acontece por serem elas pressões positivas devidas à água que se encontra dentro do tensiômetro e que atuam sobre a água da cápsula.

Deste modo, considerando, segundo Reichardt (1988), o potencial matricial da ordem de $-6/100$ atm ($-0,06$ atm) para a determinação do ponto de capacidade de campo, e sabendo-se que 1 atm corresponde a 76cm de Hg (mercúrio) e substituindo o valor de Ψ_m (potencial matricial) encontrado para $-0,06$ atm na equação (18) e medindo-se em campo, os valores de h_1 e h_2 , tem-se o valor de h , que é a leitura da coluna de mercúrio, acusada no tensiômetro. Com o correspondente valor de h (leitura em cm de Hg), sabe-se, portanto, em que momento o tensiômetro acusará a capacidade de campo. Para um solo saturado, conforme já abordado anteriormente, o Ψ_m (potencial matricial) é igual a zero, e, conseqüentemente h é igual a zero também.

Existem alguns métodos disponíveis para se medir a umidade do solo, apresentando todos limitações, ou de precisão, ou por serem dispendiosos, ou excessivamente morosos. O método termogramétrico, também denominado “gravimétrico padrão”, serve de referência para os demais métodos. É simples, absoluto e utiliza equipamentos não onerosos. Por outro lado, é um trabalhooso e demorado (Klar, 1984). Conforme EMBRAPA (1997), o

método da umidade atual (umidade gravimétrica), tem como princípio a determinação da umidade presente na amostra de solo, transportada em embalagem impermeável e vedada.

O procedimento para a determinação da umidade atual é o seguinte: as amostras são coletadas com estrutura deformada em lata de alumínio numerada e de peso conhecido. A seguir, são pesadas e transferidas para estufa a 105-110 ° C, até peso constante. Posteriormente, são retiradas da estufa, colocadas em dessecador, deixadas esfriar e devidamente pesadas em balança de precisão.

A umidade é calculada através da expressão abaixo:

$$UG = 100 (a - b)/b \quad (19)$$

onde:

UG = umidade gravimétrica (%)

a = peso da amostra úmida (g)

b = peso da amostra seca (g)

4.5 Cultivo em ambiente protegido

A origem e desenvolvimento das casas-de-vegetação ocorreram em países do Hemisfério Norte, em função de suas necessidades e dificuldades na produção no inverno. Devido ao efeito estufa que eleva a temperatura interna, ela passou a receber o nome de estufa (Janick, 1966, citado por Antunes, 2001).

A expressão cultivo protegido tem sido utilizada, na literatura internacional, com um significado bastante amplo. Ela engloba um conjunto de práticas e tecnologias (quebra-ventos, mulches de solo, casas de vegetação, túneis altos, túneis baixos, irrigação, etc.), utilizados pelos produtores para um cultivo mais seguro e protegido de suas lavouras. Lamont, em 1996, citado por Della Vecchia & Koch (1999) ressalta que o termo plasticultura também tem sido utilizado com um significado amplo, pois define um sistema de cultivo de plantas, em que um grande benefício é obtido pela utilização de produtos (filmes plásticos, tubos de irrigação, telas, etc.) derivados de polímeros plásticos.

É comum muitas pessoas associarem a utilização do plástico, principalmente as aplicações de estufas e túneis, ao cultivo de plantas somente nas regiões frias, considerando-a desnecessária para os locais de clima quente. No entanto, há muitas regiões do mundo, como por exemplo, os desertos do Oriente Médio, onde o sucesso da agricultura se deve ao manejo da água e ao domínio do clima. Israel é um dos países de agricultura mais tecnificada, consegue obter das areias do deserto um volume tal de alimentos capaz de abastecer-se e exportar grande parte da produção para a Europa. A Costa da Almeria, no sul da Espanha, entre as montanhas e o mar Mediterrâneo, há pouco mais de 20 anos era uma região deserta, onde não nasciam nem mesmo ervas daninhas. O governo espanhol decidiu o aproveitamento destas terras, instalando no local uma estação experimental. Hoje, Almeria é uma das principais regiões produtoras de hortigranjeiros da Europa, com mais de 15 mil hectares contínuos e cultivados em estufas, onde se produz de tudo durante o ano, apesar de nesta região chover menos que no deserto do Saara; onde a água para uso agrícola é tirada de poços artesianos, além de que o solo é de arenito em formação, impossível de ser cultivado; onde os canteiros são feitos de areia tirada da praia. Assim mesmo é a região de maior renda

per capita da Espanha, tratando-se da maior concentração mundial de plásticos aplicados na agricultura (Sganzerla, 1997).

BRASIL (1987) ressalta que os custos com tubulações e energia são reduzidos, devido ao fato da irrigação por gotejamento limitar a aplicação de água a locais específicos em porções diárias, de modo a repor sua perda pela planta e pelo solo, aliado ao fato do desenvolvimento do uso do plástico na agricultura.

Desde o começo dos anos 50, os sucessos da agricultura estão relacionados com o uso dos materiais plásticos, mesmo que corretamente empregados somente nos últimos dez anos. Em 1951 surgiu no Japão, o primeiro filme de PVC para emprego agrícola (Sganzerla, 1997). Japão, China, Estados Unidos, Inglaterra e Israel lideraram esta introdução na década de 50, seguidos pela Espanha, França, Grécia, Turquia, Itália e outros países da costa do mar Mediterrâneo, na década seguinte. Nessa década observa-se também um rápido crescimento do cultivo protegido de hortaliças em ambiente protegido na China e Japão (Wittner, em 1993, citado por Della Vecchia & Koch, 1999).

No Brasil, Goto (1997) relata que as primeiras citações da utilização do plástico no cultivo de hortaliças são referentes aos trabalhos pioneiros realizados por Kimoto & Conceição, em 1967, onde os autores demonstraram a eficiência do plástico na cultura do morango, cobrindo os canteiros (mulching). Já com relação à utilização do plástico em estruturas, com finalidade de proteção contra adversidades climáticas, há os trabalhos de Martins, em 1983, realizados em Manaus (AM), no final da década de 70, que provaram a eficiência da utilização desse material na produção de hortaliças. Ressalta também no estado de São Paulo, na década de 80, a utilização da técnica de cultivo de hortaliças em ambiente

protegido por produtores cooperados da extinta Cooperativa Agrícola de Cotia na região do cinturão verde da cidade de São Paulo.

Sganzerla (1997) relata que no Brasil, na década de 80 a 90, objetivando a difusão da plasticultura, houve uma iniciativa nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e São Paulo através do desenvolvimento do Projeto São Tomé, em meados da década de 80. Nesse projeto, os resultados obtidos com as culturas desenvolvidas dentro das estufas foram de extrema surpresa e incredibilidade. Nessa época, em plena safra normal, fora da estufa, a tonelagem média mal passava das 35 t/ha, enquanto que a média de produção de tomate em todas as estufas demonstrativas ficou em 162 t/ha. Houve um entusiasmo muito grande em função dos ótimos resultados. A estufa foi uma agradável novidade que apareceu e atraiu a atenção de muitas pessoas até mesmo ligadas a outras atividades. Nesta mesma década, Araújo, em 1991 menciona que diversas empresas privadas são criadas nos meados da década, visando o desenvolvimento, produção e comercialização de estruturas metálicas para a construção de estufas. Empresas químicas e petroquímicas também envolveram-se mais diretamente com a produção de filmes de polietileno de melhor qualidade no Brasil (Della Vecchia & Koch, 1999).

Segundo Siqueira (AEASP, s.d.) desde o aparecimento da indústria petroquímica, o plástico tem sido empregado na atividade agropecuária, com maior e cada vez mais relevante participação na produção de alimentos, substituindo materiais tradicionais como a madeira, o ferro e o cimento, com a finalidade de minimizar os custos de produção, ou inovar técnicas tradicionais e incorporar avanços tecnológicos com imediato incremento da produtividade.

Tivelli (1998) menciona que no período de janeiro a abril de 1995, a Associação dos Engenheiros Agrônomos do Estado de São Paulo (AEASP) realizou um levantamento em todo o Estado de São Paulo com o objetivo de conhecer o mercado de plasticultura. Entre os dados obtidos, foram encontrados 897 ha com algum tipo de cultivo em ambiente protegido.

Minami, em 1995, citado por Della Vecchia & Koch (1999) relata que no Brasil, observou-se também um rápido crescimento desse cultivo, no início da década de 90. Estimativas apresentadas em 1994 apontavam para uma área de produção de hortaliças em ambiente protegido de cerca de 2 mil hectares, taxa anual de crescimento de 30% e projeções para uma área de cerca de 10 mil hectares na virada do milênio.

Ainda, Della Vecchia & Koch (1999) afirmaram que estimativas da área de produção de hortaliças em ambiente protegido no Brasil, para o ano de 1998, não corroboram com as expectativas de crescimento do início da década. De acordo com levantamento efetuado em 1999, cerca de 1.390 ha foram cultivados com hortaliças nesse sistema, no Brasil, no ano de 1998. São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul foram os estados com maior área de produção. Dentre as hortaliças mais utilizadas destacaram-se o pimentão, a alface, o tomate e o pepino. Dentre os diversos fatores apontados como responsáveis pelo baixo crescimento do cultivo protegido de hortaliças no Brasil, Goto (1997) aponta: equívocos ou má-fé na divulgação da tecnologia, sem o respaldo de informações adequadas previamente geradas e testadas pela pesquisa agrícola, que resultaram em experiências negativas para muitos produtores, com prejuízo econômico e conseqüente descrença no uso desse sistema de produção, equívocos no estabelecimento de prioridades de pesquisa para o atendimento das demandas reais do setor, entre outros (Della Vecchia & Koch, 1999). Da mesma maneira,

Rodrigues, 1996, citado por Leite Júnior (2000), afirma que, entre os vários motivos que leva ao retardamento do sucesso do cultivo protegido no Brasil, deve-se à escassez de pesquisa e a carência de técnicos aptos a atuarem nessa área.

Também Goto (1997) conclui que existe grande perspectiva para os cultivos protegidos, pois esta é uma tecnologia bastante utilizada em algumas regiões e os produtores que estão desde o início ou que estão há pelo menos cinco anos na atividade não vão retroceder e tão pouco pretendem voltar a cultivar somente em campo aberto. Considera ainda a existência de uma grande perspectiva de expansão desta tecnologia, que é capaz de utilizar pequenas áreas e produzir pelo menos uma vez e meia ou o dobro do que se consegue produzir em campo aberto, desde que se saiba manejar a estrutura e o ambiente em questão, respeitando a espécie a ser instalada.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no período de 10 de janeiro a 30 de Julho de 2001, na Fazenda Experimental São Manuel, da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Botucatu, localizada no município de São Manuel, Estado de São Paulo, a 22°46'05" de latitude sul e 48°34'11" de longitude oeste de Greenwich e 740m de altitude.

Carvalho et al. (1983) relata que Tubelis et al., 1971, agrupando os dados de precipitação relativos ao período de 1940 a 1968 e os de temperatura do ar de 1959 a 1968, encontrou um total médio de 1.314mm de chuvas anual e uma temperatura média mensal de 19,4°C. De acordo com valores médios observados, pela classificação de Köppen, o

clima da região pertence à classe Cwb (mesotérmico de inverno seco), em que a temperatura do mês mais quente não ultrapassa 22°C, sendo julho o mês mais seco e mais frio. A estação seca vai de maio a setembro, enquanto o mês mais quente e úmido é janeiro. O balanço hídrico, pelo Método de Thornthwaite, 1948, citado por Carvalho et al. (1983), revelou uma deficiência total de água de 29 mm anualmente (de maio a setembro) e um excedente hídrico de 439mm (outubro a abril).

Segundo dados meteorológicos obtidos na FCA-UNESP/Botucatu para o período de 1974/86, a umidade relativa média do ar é de 71,50% e a velocidade dos ventos de 5,45km/h (Antunes, 2001).

O solo, no qual foi instalado o experimento, pertence a uma faixa de solo classificada como Latossolo Vermelho Amarelo de textura média, com camada superficial de textura arenosa e relevo suave a ondulado.

A análise granulométrica do solo foi determinada pelo Laboratório de Física do Solo do Departamento de Recursos Naturais da FCA/UNESP e os valores encontrados para areia total (%), argila (%) e silte (%) foram de 80, 12 e 8%, respectivamente; o que caracterizou textura arenosa. O valor da massa específica do solo também foi determinado, sendo encontrado o valor de 1,62 g/cm³.

As características químicas do solo foram obtidas de amostras de solo da área, coletadas em “zigue-zague” e retiradas na profundidade de 0-20cm. Foram determinadas no Laboratório de Fertilidade do Solo do Departamento de Recursos Naturais da FCA/UNESP e os resultados encontram-se dispostos no Quadro 1.

Quadro 1: Características químicas da área experimental, na profundidade de 0-20 cm.

Prof. (cm)	pH (CaCl ₂)	M.O. g/dm ³	P _{resina} mg/dm ³	H + Al -----	K -----	Ca -----	Mg -----	SB -----	CTC -----	V%
				mmol/dm ³						
0-20	6,7	10	137	12	1,1	37	18	56	68	82

Os valores dos teores de água no solo, para a camada de 0-20cm, com amostras deformadas, foram determinados, segundo Leite Júnior (2000) e Antunes (2001) no Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia Rural da FCA/UNESP e encontram-se dispostos no Quadro 2.

Quadro 2: Valores dos teores de água no solo (g.g⁻¹) e potencial matricial (kPa) para a camada de 0-20cm.

Ψ (kPa)	U ₀₋₂₀ (g.g ⁻¹)
-10	0,1050
-30	0,0976
-50	0,0755
-100	0,0700
-500	0,0590
-1500	0,0550

Adicionalmente, também foram determinados mais dois valores dos teores de água no solo relativos ao potencial matricial de -8 kPa e -6 kPa para a camada de 0-20cm com amostras indeformadas, cujos valores foram, respectivamente de 0,1097 e 0,1242 g.g⁻¹.

5.2 Material

5.2.1 Material utilizado para a montagem do experimento

5.2.1.1 Caracterização da estufa e malha experimental

Para a condução do experimento foi utilizada uma estufa de dimensão de 5,0m x 20,0m e altura na parte central de 2,65m. A estrutura foi coberta com um filme transparente de 150 micras de espessura, esticado e preso nas laterais das estruturas por sarrafos de madeira (2 ½" x 1") por meio de pregos e parafusos. Todas as bordas da estufa foram revestidas com o mesmo filme transparente, sendo que o mesmo foi enterrado e esticado no solo até a largura de 1,50m, com a finalidade de evitar a infiltração de água nas laterais.

Na estufa de 5,0 x 20,0m (100 m²) procedeu-se o estaqueamento da área com a utilização de estacas de madeira de 0,50m cada. As estacas foram cravadas no solo com a finalidade de demarcar a malha de amostragem estabelecida no espaçamento de 0,5 x 1,0m, acrescida de mais quatro adensamentos de 0,25m na 4^a, 8^a, 14^a e 18^a linha, totalizando 226 pontos de amostragem. Para a determinação da umidade do solo, foram utilizados 178 pontos. A Figura 07 apresenta o esquema da grande malha experimental, contendo os quatro adensamentos, os pontos de amostragem e os 178 pontos utilizados para a determinação da umidade.

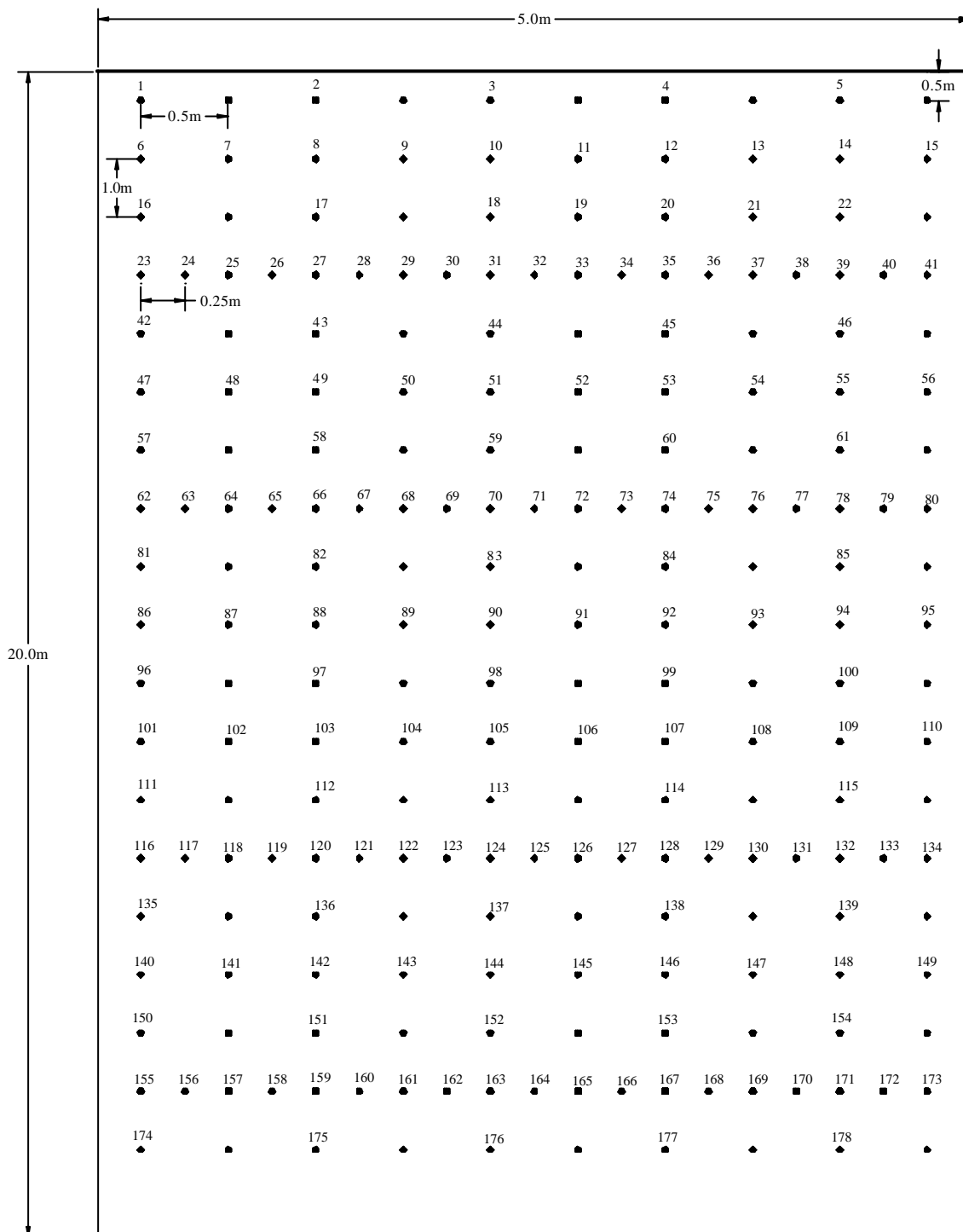


Figura 07: Esquema da grande malha experimental demarcada na estufa, contendo os quatro adensamentos e os respectivos pontos de amostragem.

5.2.1.2 Equipamento de irrigação

Foi utilizada uma bomba trifásica de 5 CV, cuja pressão adequada foi mantida pelo regulador de pressão para o bombeamento da água no sistema. O suprimento de água do sistema foi feito por meio de um reservatório de 20m³, cuja água era proveniente de uma mina, com uma condutividade elétrica igual a 0,1583 dS/m a 25 ° C.

Foi utilizado um sistema de irrigação por gotejamento com Fita Gotejadora Chapin “Scarcelli”; 8 mil/200 micra de espessura da parede; com vazão média de 2,41L.h⁻¹.m⁻¹ à pressão de 10,0m.c.a. e espaçamento entre saídas de gotas de 20 cm, com cinco linhas laterais de irrigação, dispostas superficialmente ao longo da estufa no sentido longitudinal.

A linha principal, de PVC com 25mm de diâmetro, foi colocada na lateral da estufa, sendo nesta instalada uma linha de derivação, com um registro geral de esfera de ¾”, filtro de tela de aço de 150 mesh, um regulador de pressão para mantê-la a 10,0 m.c.a. e um manômetro tipo Bourbon, com glicerina, para proceder a verificação. As cinco linhas laterais de irrigação foram conectadas à linha de derivação através de derivações tipo “T” e presas através de braçadeiras.

Foi instalada também uma bateria de 06 tensiômetros de mercúrio, dispostos aleatoriamente no interior da estufa, para que se pudesse verificar o ponto de saturação e a capacidade de campo do solo.

Para a determinação da vazão dos gotejadores, foi utilizado cronômetro, copos plásticos apropriados para a coleta da água distribuída e proveta para a medição do conteúdo de água.

Na Figura 08 pode-se observar a estufa utilizada para a condução do experimento. Observando-se a Figura 09 tem-se um detalhe do sistema de irrigação por gotejamento e dos tensiômetros utilizados.



Figura 08: Vista da estufa utilizada para a condução do experimento.



Figura 09: Disposição do sistema de irrigação por gotejamento e dos tensiômetros.

5.2.1.3 Material utilizado para a determinação da umidade do solo

Para a determinação da umidade do solo pelo método da umidade atual (método gravimétrico), conforme EMBRAPA (1997) utilizou-se o trado tipo holandês, para diminuir a porção retirada de solo, evitando assim uma destruição em proporções maiores da camada superficial do mesmo. Para a acomodação das amostras retiradas na profundidade de 0-20cm, utilizou-se latas de alumínio numeradas e adequadamente vedadas com fita adesiva.

Para a secagem das amostras, utilizou a estufa; para o esfriamento das amostras, utilizou-se o dessecador e para a pesagem das amostras, utilizou-se a balança de precisão, sendo todos os instrumentos relatados pertencentes ao Laboratório de Física do Solo, do Departamento de Recursos Naturais da FCA/UNESP.

5.2.1.4 Programas computacionais

Foram utilizados para a digitação e análise dos dados:

- planilhas confeccionadas no programa Excel;
- programa geoestatístico GS+ (GS+, 2000).

5.3 Métodos

5.3.1 Manejo da irrigação

Para a determinação da vazão dos gotejadores e dos coeficientes de uniformidade de distribuição de água do sistema de irrigação, foram amostrados os pontos, em três coletas, sendo a média dos valores obtidos nas três coletas utilizada para os cálculos. Para a determinação da vazão dos gotejadores e dos coeficientes de uniformidade de distribuição, foi utilizada a pressão de 10,0 m.c.a. Utilizou-se um método proposto por Keller e Karmeli, conforme descrito por Bernardo (1995), que recomenda a obtenção das vazões em quatro pontos ao longo da linha lateral, ou seja, do primeiro gotejador, do gotejador situado a 1/3 do comprimento, do gotejador situado a 2/3 do comprimento e do último gotejador. As linhas

laterais selecionadas para determinação, ao longo da linha de derivação devem ser a primeira linha lateral, a linha lateral situada a 1/3, a situada a 2/3 e a última linha lateral. Em razão do pequeno número de pontos determinados em cada linha lateral, principalmente em se tratando de linhas de maior comprimento, sugere-se a coleta de dados em oito gotejadores por linha lateral, usando o seguinte critério de seleção dos gotejadores: determinar a vazão do primeiro gotejador, dos gotejadores situados a 1/7, 2/7, 3/7, 4/7, 5/7, 6/7 e do último gotejador. As quatro linhas laterais selecionadas ao longo da linha de derivação, para a determinação, devem ser a primeira e as situadas a 1/3, 2/3 e a última.

O coeficiente de uniformidade de distribuição é determinado pela seguinte equação:

$$CUD = \frac{\text{média de } \frac{1}{4} \text{ das vazões, com menores valores} \times 100}{\text{média de todas as vazões}} \quad (20)$$

O manejo da irrigação foi feito com base na utilização de uma bateria de seis tensiômetros de mercúrio, usando os pontos de capacidade de campo e de saturação.

Considerando o exposto por Reichardt (1988), o potencial matricial da ordem de 0,06atm (- 6KPa) foi utilizado para a determinação do ponto de capacidade de campo.

Procedeu-se a irrigação da área, utilizando o sistema de irrigação por gotejamento com a pressão de 10,0 m.c.a. até que o solo atingisse o ponto de saturação. Após a saturação do solo, o sistema de irrigação foi desligado para atingir a capacidade de campo. Para essa verificação, foi considerado o valor médio de h, ou seja, a média dos seis valores de h encontrados para os seis tensiômetros instalados. Portanto, quando os tensiômetros acusaram

o ponto da capacidade de campo, imediatamente, procedeu-se a coleta das amostras indeformadas para a posterior determinação da umidade do solo em laboratório.

5.3.2 Método de coleta e determinação da umidade do solo

Foram realizadas três coletas de solo para a determinação dos teores de água do solo em 178 pontos, nos dias 06 de julho, 18 de julho e 31 de julho de 2001, sendo que os valores considerados para a análise dos dados foram resultantes da média das três coletas. A profundidade do solo utilizada para a coleta das amostras para a determinação de umidade do solo foi de zero a vinte centímetros.

A análise da umidade do solo foi realizada conforme EMBRAPA (1997) pelo método da umidade atual (método gravimétrico).

5.3.3 Análise geoestatística dos dados

Para o estudo da variabilidade e dependência espacial da umidade do solo da área estudada, inicialmente procedeu-se a associação do atributo às suas respectivas posições no campo. Uma malha de amostragem foi estabelecida no espaçamento de 1 em 1m no sentido vertical e de 0,5 em 0,5 m no sentido horizontal com mais quatro adensamentos de 0,25m, totalizando 226 pontos. Daí foram determinadas às coordenadas espaciais de cada ponto amostrado, conforme técnica proposta por Isaaks & Srivastava (1989).

A análise da dependência espacial, determinada pelo variograma foi obtida com o auxílio do Programa GS+ “Geostatistical for Environmental Sciences”, Versão

5.0 (GS+, 2000), que utiliza os valores das variáveis de umidade associados às suas respectivas coordenadas de campo.

Tipicamente, todos os pares de amostras possíveis foram examinados e agrupados dentro de classes (“Lags”) de distâncias e direções aproximadamente iguais. Para esse processo, foram construídos os variogramas experimentais (Deutsch & Journel, 1998) e posteriormente definidos os modelos teóricos de variogramas. Os modelos teóricos de variogramas; esférico, exponencial, Gaussiano, linear e linear com patamar; foram superpostos à seqüência de pontos obtidos no variograma experimental, de modo que a curva que melhor se ajustou aos pontos do variograma até onde a curva se estabiliza representasse a magnitude, alcance e intensidade da variabilidade espacial da variável estudada.

Na análise estrutural do variograma foram fornecidos o efeito pepita (C_0), o patamar ($C + C_0$) e o alcance (a). Além desses, outros parâmetros foram fornecidos para análise posterior:

- Alcance efetivo: para o modelo esférico, linear e linear com patamar, o alcance é igual ao efetivo. Para os outros modelos (Gaussiano e exponencial), o alcance efetivo representa $3A$ e $1,7A$, respectivamente, devido ao longo espaço de curvatura da curva (Guerra, 1988).
- Estrutura ou Proporção Espacial $C/(C + C_0)$: determina quanto da variância espacial está presente na variância total da amostra;
- Coeficiente de Determinação ou Regressão (r^2): que indica qual proporção de pontos do variograma experimental encontram-se na curva do modelo teórico, embora não seja considerado um bom indicativo de ajuste (Guerra, 1988).

A análise da dependência espacial foi estudada pela detecção do índice de dependência espacial, considerando Zimback (2001), que adaptou os limites propostos por

Cambardella et. al (1994) e considera a dependência espacial para valores $< 25\%$ - fraca dependência espacial; de 25 a 75% - moderada dependência espacial; $> 75\%$ - forte dependência espacial.

Na análise do variograma, também foi verificada a possibilidade da variável estudada possuir a propriedade de anisotropia, que é a heterogeneidade das distribuições das variâncias em ângulos diferentes no espaço (Englunds & Sparks, 1988); sendo que quando o variograma é isotrópico, apenas um (o unidirecional) é suficiente para descrever a variabilidade da variável no campo.

5.3.4 Interpolação dos dados

A krigagem dos valores de umidade obtidos, que consiste numa interpolação desses valores entre os pontos amostrados, foi efetuada pelo módulo Interpolação - krigagem do programa GS+ (GS+, 2000).

Foi verificado na literatura que a krigagem ordinária é o mais indicado método de interpolação para atributos de solos, podendo ser pontual ou em bloco. A krigagem pontual é indicada quando a coleta é de amostras simples, isto é, não foram misturadas várias amostras para compor uma amostra composta representando uma malha. No caso da amostra composta, é indicada a krigagem em bloco, porque ela irá representar uma área. No presente estudo, as amostras foram simples, e, portanto, a krigagem indicada e utilizada foi a pontual (Webster, 1985).

A visualização dos resultados foi feita na forma de mapas bidimensionais e tridimensionais, utilizando o programa GS+ (GS+, 2000).

5.3.5 Validação cruzada

A Validação Cruzada (“cross-validation”) foi empregada para avaliar os resultados obtidos. Para isso, cada valor de dado foi eliminado e daí esse valor foi estimado usando-se informações dos dados restantes, de acordo com o método descrito por Kane et al. (1982) e Goovaerts (1997).

Ainda, segundo Goovaerts (1997), um fator que afeta o cálculo de precisão do método de interpolação é o número de amostragens vizinhas usadas para a estimação. O número de amostras foi fixado em 16 (Burgess & Webster, 1980 e Kravchenko & Bullock, 1999), que é o número escolhido automaticamente pelo programa e verificado que é o que melhor estima os pontos.

A exatidão da seleção do modelo do variograma foi medida através do erro entre os dados medidos e os valores estimados (Zhang et al., 1995). O critério de validação cruzada empregado para selecionar o variograma foi o coeficiente de determinação entre os valores obtidos e estimados (Myers, 1991).

O erro padrão de estimação avaliou quantitativamente o ajuste do variograma e os erros dele decorrentes na krigagem, utilizando-se os conceitos definidos por Davis (1987).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Coeficiente de uniformidade de distribuição e vazão dos gotejadores

A vazão média dos gotejadores foi de $2,41 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-1}$, à pressão de 10,0 m.c.a..

Para o cálculo do coeficiente de uniformidade de distribuição de água utilizou-se o método proposto por Keller e Karmeli, conforme descrito por Bernardo (1995). O CUD (coeficiente de uniformidade de distribuição) encontrado foi de 97,97%, ou seja, de aproximadamente 98%, o que caracteriza uma ótima distribuição.

6.2 Análise espacial

Conforme descrito por Journel & Huijbregts (1978) e Isaaks & Srivastava (1989), realizou-se a análise espacial através da análise dos variogramas, utilizando-se o programa GS+ (GS+, 2000).

6.2.1. Análise variográfica

As análises espaciais foram executadas pelo módulo “Análise da semivariância” do programa GS+ (GS+, 2000).

Para a confecção do variograma unidirecional foi verificada a pouca consistência do ajuste efetuado automaticamente pelo programa considerando o pouco número de classes para as distâncias menores. Por esse variograma poderia ser considerado efeito pepita puro. Procurando-se proceder a uma análise mais acurada foi verificada a existência ou não de anisotropia nos ângulos de 0°, 45°, 90° e 135°, segundo os parâmetros estabelecidos por Zimmerman (1993).

Nas Figuras 10, 11, 12 e 13 estão apresentados os variogramas anisotrópicos obtidos para a umidade do solo, respectivamente para as direções 0°, 45°, 90° e 135°.

A Figura 10 apresenta o variograma anisotrópico da umidade do solo para a direção 0°, sendo que nela procedeu-se o ajuste pelo modelo esférico.

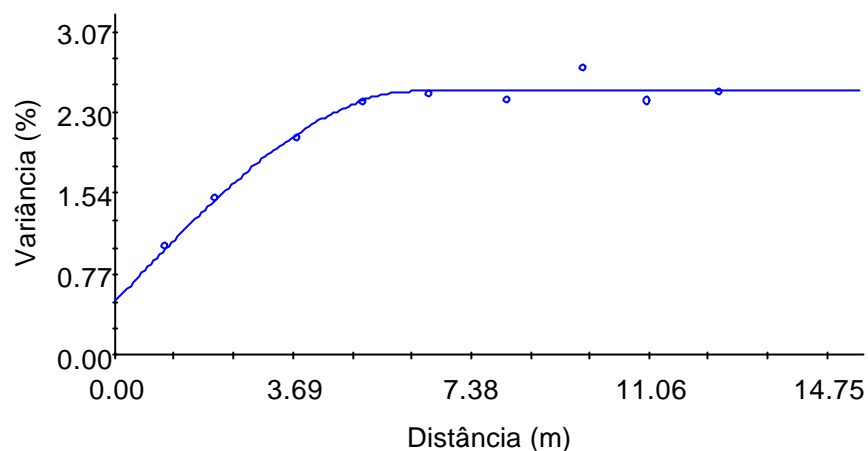


Figura 10: Variograma anisotrópico da umidade do solo (%) na direção 0°.

Os parâmetros obtidos pela análise variográfica, após o ajuste, com o modelo esférico, para a direção 0°, foram:

- Efeito Pepita (C_0) = 0,51000;
- Patamar ($C_0 + C$) = 2,50000;
- Alcance = 3,2960;
- Estrutura ou Proporção Espacial $C/(C + C_0)$ = 0,7960;
- Coeficiente de determinação (r^2) = 0,307.

Na Figura 10, que apresenta o variograma anisotrópico para a umidade do solo para a direção 0°, pode-se notar uma dependência espacial, caracterizada como dependência forte ($C/C + C_0 = 0,7960$).

O parâmetro de alcance encontrado foi de 3,2960m, ou de aproximadamente 3,30m. Segundo Guerra (1988) o alcance corresponde ao conceito da zona

de influência ou dependência espacial de uma amostra, marcando a distância a partir da qual as amostras tornam-se independentes. Trangmar et al. (1985) mencionam que amostras separadas por distâncias menores que o alcance são espacialmente relacionadas e que aquelas separadas por distâncias maiores do que os alcances, não são espacialmente relacionados. Segundo Prevedello (1987), citado por Takeda (2000), para garantir a tão comentada independência entre os pontos amostrais, tal intervalo deve ser, no mínimo, de duas vezes o valor do alcance determinado para um atributo qualquer. Desse modo, no planejamento de experimentos de irrigação, onde se almeja a independência entre observações, o intervalo de amostragem deveria ser no mínimo duas vezes o alcance. A intensidade de amostragem também poderia ser aumentada para um valor de 3m, já que o alcance encontrado foi de aproximadamente 3,30m; e não necessariamente a cada 1m no sentido vertical e a cada 0,5m no sentido horizontal, como foi realizada. Com isso, tem-se uma redução do número de amostras, o que é de extrema importância, principalmente quando se trabalha com variáveis difíceis de serem determinadas, ou mesmo quando a sua determinação é, às vezes, onerosa.

Portanto, o alcance da dependência espacial da umidade representa a distância na qual os pontos de amostragem apresentam-se correlacionados, sendo um parâmetro de fundamental importância para planejamento e avaliações de experimentos de irrigação, não somente para determinar a intensidade de amostragem, como também ajudar no planejamento de programas de irrigação, uma vez que detecta até onde uma variável em estudo apresenta dependência espacial. A umidade do solo também é importante, pois a partir de seus valores pode-se avaliar o armazenamento de água ao longo do perfil do solo em uma determinada profundidade.

As Figuras 11, 12 e 13 apresentam os variogramas anisotrópicos, da umidade do solo, para as direções 45° , 90° e 135° , sendo que nestas direções não foi possível ajustar modelos teóricos aos dados experimentais, provavelmente devido ao número reduzido de pontos nestas direções e também o efeito predominante da anisotropia na direção 0° .

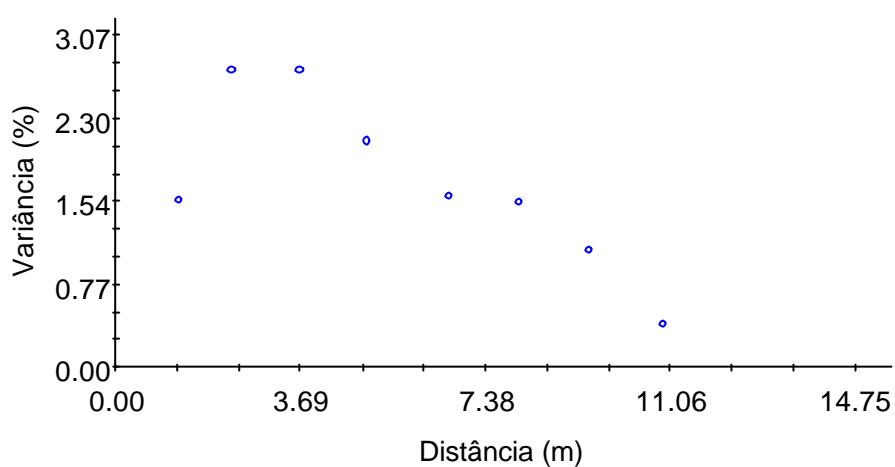


Figura 11: Variograma anisotrópico da umidade do solo (%) na direção 45° .

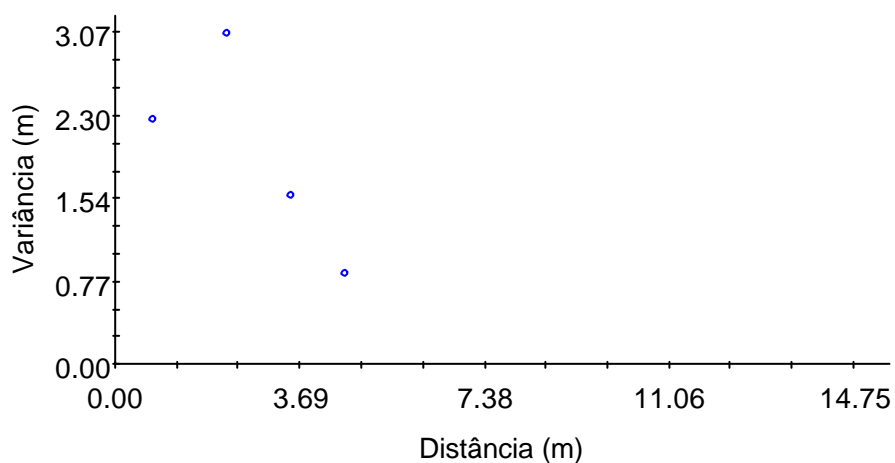


Figura 12: Variograma anisotrópico da umidade do solo (%) na direção 90° .

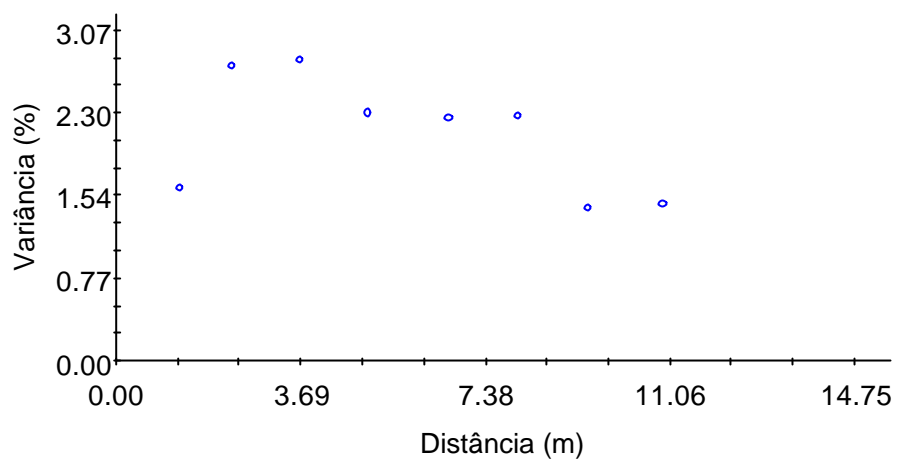


Figura 13: Variograma anisotrópico da umidade do solo na direção 135°.

Nas Figuras 14 e 15 estão apresentadas as superfícies dos variogramas 2D e 3D.

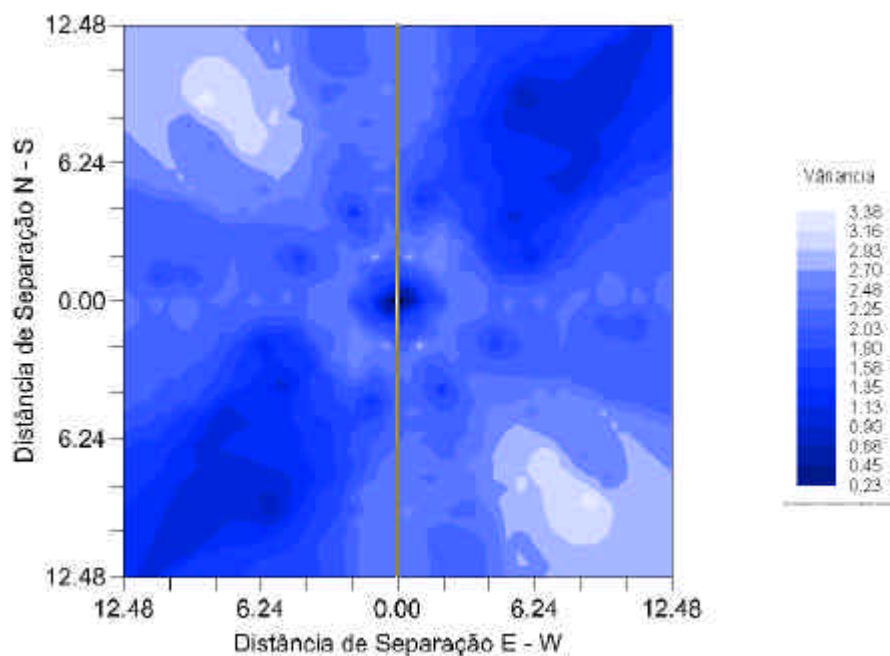


Figura 14: Superfície 2D do variograma anisotrópico.

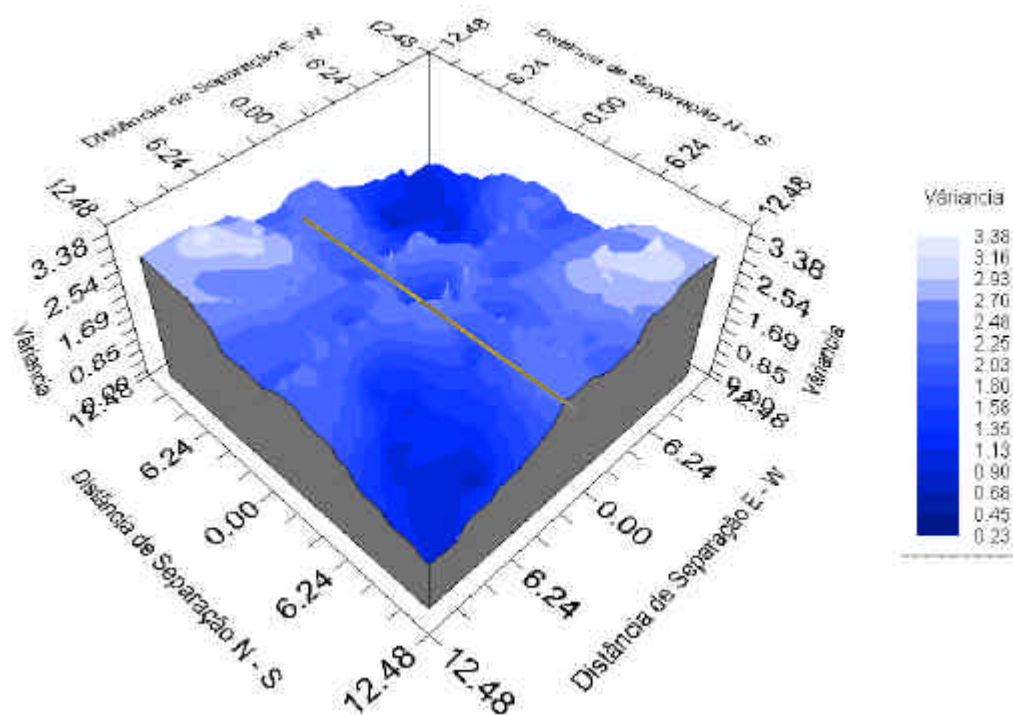


Figura 15: Superfície 3D do variograma isotrópico.

As superfícies 2D e 3D do variograma anisotrópico foram processadas através do Módulo “Superfície da Variância Anisotrópica” do Programa GS+ (GS+, 2000). A visualização da variância para cada direção possibilita uma maior facilidade em encontrar a direção de maior continuidade espacial. Ainda, nas Figuras 14 e 15, o eixo Z é a variância, e os eixos X e Y são as distâncias de separação em E – W e N – S, respectivamente. O centro do mapa corresponde à origem do variograma $\gamma(h) = 0$ para cada direção. Estas figuras permitem ainda a comprovação do que já foi abordado com relação à Figura 10, onde se pode constatar uma maior dependência espacial na direção 0° . Tal fenômeno de anisotropia, com maior variação na direção N-S, foi similarmente descrito por Brooker & Winchester (1995), pois ao estudarem a variação espacial da água prontamente disponível num vinhedo irrigado,

observaram, através dos variogramas estudados, o fenômeno da anisotropia, sendo que a variação na direção N – S foi bem maior do que a direção E – W. Concluíram, também, que este fenômeno poderia influenciar no projeto do sistema de irrigação.

A anisotropia verificada no presente trabalho também serve de indicativo para a modelagem do sistema de irrigação. O projeto de irrigação poderia ser com duas linhas de derivação, ao invés de somente uma linha, como foi no campo experimental. É importante ressaltar que tal mudança somente seria justificada para fins de experimentação agrícola, onde se tem uma utilização e aplicabilidade dos dados a longo prazo, principalmente quando se desenvolve trabalhos de melhoramento genético e de manejo do solo. Para o agricultor, talvez tal mudança no projeto de irrigação seja inviável, pois envolve um maior custo, devido a um maior número de linhas. Embora, considerando o investimento inicial em estruturas relativamente caras pelo agricultor ao optar pelo cultivo em ambiente protegido, e considerando o exposto por Goto (1997), que existe uma perspectiva de expansão da tecnologia de cultivo protegido, as contribuições da pesquisa, procurando resolver problemas de manejo de irrigação em ambientes protegidos são muito válidas.

6.2.2 Interpolação dos dados – krigagem

Foi realizada a interpolação dos dados utilizando a krigagem ordinária pontual, com base nos variogramas anisotrópicos.

Na Figura 16 pode-se observar a krigagem 2D e na Figura 17, pode ser observada a krigagem 3D.

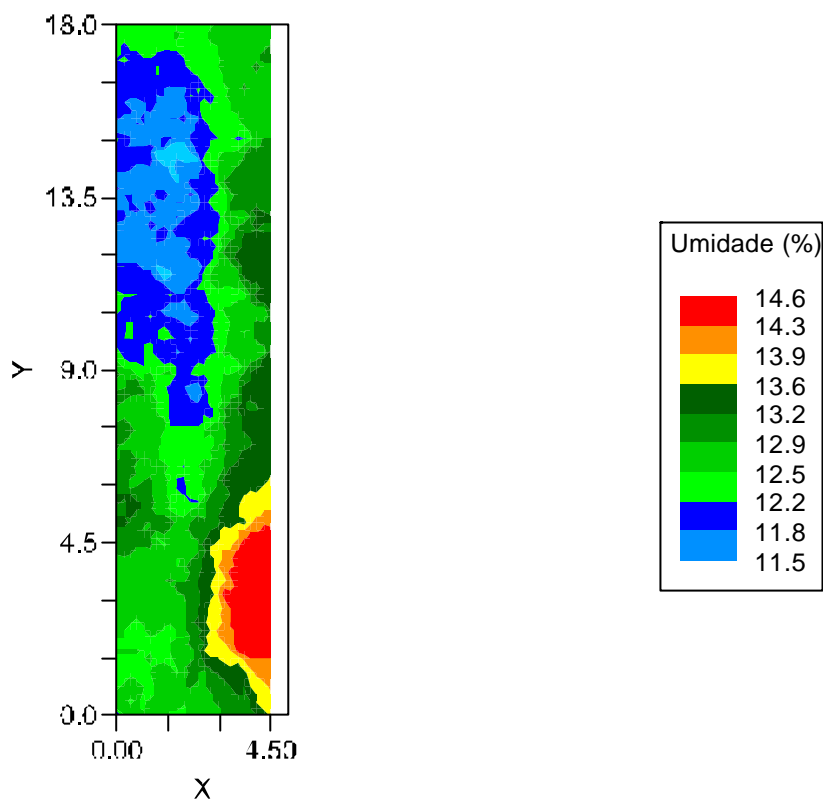


Figura 16: Representação bidimensional da krigagem da umidade do solo.

Considerando o exposto por Vieira et al. (1983) e Brooker & Winchester (1995), que mencionaram a krigagem como um bom interpolador, foram confeccionados os mapas interpolados por krigagem da área estudada.

Foram utilizados também, para o cálculo da krigagem, os parâmetros obtidos pela análise espacial, ou seja, o alcance, efeito pepita e patamar, uma vez que a krigagem é um método geoestatístico de interpolação, sendo necessário detectar a distância espacial entre as amostras, para o atributo em estudo (Yost et al., 1982).

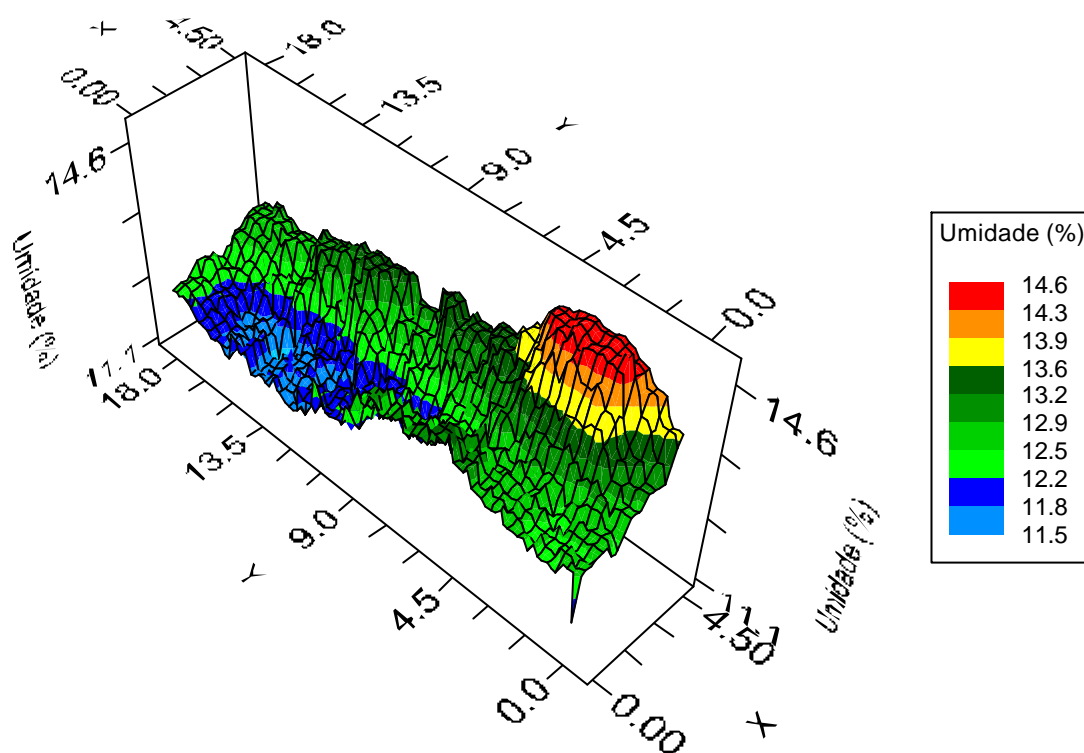


Figura 17: Representação tridimensional da krigagem da umidade do solo.

Pela análise das Figuras 16 e 17 e considerando-se os valores de umidade analisados, observa-se uma heterogeneidade na distribuição da água na maior parte da estufa utilizada no presente estudo. Apesar do valor do coeficiente de uniformidade de distribuição ser considerado ótimo, pode-se também observar, valores maiores de umidade do solo na porção inicial da estufa, no canto inferior direito da Figura 16, fato este atribuído a uma maior proximidade dos gotejadores à saída de água, ou seja, ao início do sistema de irrigação, onde se tem uma menor perda de carga e uma maior distribuição de água. Já na porção final da estufa, mais precisamente no canto superior esquerdo da Figura 16, observa-se uma diminuição dos valores de umidade do solo, o que pode ser justificável pelo fato de ser

esta uma área característica de final de linha lateral do sistema de irrigação por gotejamento, onde a perda de carga é considerável. Bernardo (1995) afirma que a perda de carga das tubulações é considerada uniforme, ao longo de qualquer trecho de uma canalização de diâmetro constante, sendo a principal perda de carga na maioria dos projetos de condução de água.

6.2.3 Validação cruzada

Segundo Davis (1987), a validação cruzada é um método adequado para definir a exatidão da krigagem como interpolador. Na Figura 18, é mostrada a validação cruzada dos dados interpolados.

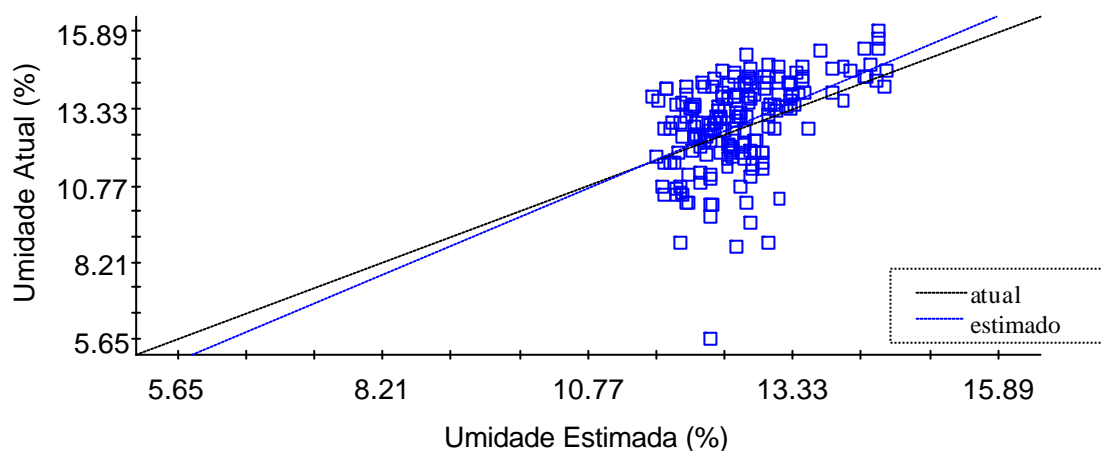


Figura 18: Validação cruzada da umidade do solo.

Pela Figura 18 pode-se verificar que os dados estimados foram muito próximos dos dados reais, comprovando que a krigagem ordinária é um ótimo interpolador.

Para a caracterização da variabilidade espacial da umidade do solo, os dados analisados permitiram consolidar a abordagem feita por Cataneo (1997), que relata a presença de variabilidade espacial nas parcelas em ambiente protegido.

A umidade do solo é uma das propriedades importantes para fins de manejo de irrigação, influenciando sobre parâmetros das culturas, como absorção de nutrientes e resposta à adubações e produtividade. No presente estudo foi abordada a variabilidade espacial da umidade do solo. O estudo da variabilidade temporal dessa propriedade também seria interessante, uma vez que descreveria a manutenção da posição relativa do valor da umidade do solo em cada ponto, em relação à média.

Considerando as abordagens realizadas, também poderia ser utilizada a cokrigagem, que é uma técnica de interpolação utilizada quando se tem uma variável mais fácil de ser mensurada do que outra, ou mesmo quando se tem uma pequena quantidade de dados conhecidos e gostaria de obtê-los para locais onde estes não são conhecidos. Também é válida quando se tem uma variável de difícil determinação, o que às vezes requer uma disponibilidade maior de tempo ou mesmo quando a determinação é onerosa. Nesse sentido, seria interessante um estudo utilizando-se dados de vazão dos gotejadores para se estimar os valores de umidade do solo através da cokrigagem, uma vez que a determinação da umidade do solo pelo método gravimétrico demanda um período de cerca de 24 horas, sendo mais demorada que a obtenção da vazão dos gotejadores, que requer apenas alguns minutos. A comprovação da eficiência da cokrigagem para essa estimativa, objetivaria auxiliar no dimensionamento de projetos de irrigação mais precisos, em função das culturas e suas exigências hídricas.

Sintetizando os dados estudados e considerando a aplicação agrônômica dos mesmos, é importante ressaltar que foram extraídos relacionando água e solo, e não água-solo-planta. Para fins agrícolas, é importante adaptá-los para uma determinada cultura, onde a umidade do solo é de fundamental importância, uma vez que diferentes culturas apresentam também diferentes exigências hídricas e, portanto, lâminas de água distintas. Relacionando os dados da distribuição da umidade num sistema de irrigação por gotejamento em cultivo protegido, pôde-se valer dos mesmos para avaliar, por exemplo, a melhor distribuição do sistema de irrigação no interior da estufa, associando-o a distribuição da umidade e exigências da cultura. Desse modo, é importante o estudo da variabilidade espacial da umidade, principalmente em cultivo protegido, onde é realizado um número sucessivo de cultivos, sendo que tais dados são de aplicação a longo prazo, principalmente para condução de experimentos. Na implantação de uma cultura visando avaliar o grau e resposta a determinadas adubações, comportamento em relação a um manejo do solo específico, ou ainda, um melhoramento genético, tal estudo é interessante. É importante considerar também que o cultivo protegido é um ambiente com certas peculiaridades, quando comparado com o implantado no campo, por isso, estudos relacionando variabilidade espacial da distribuição da umidade em cultivo protegido, sob diferentes culturas seriam de vital importância.

7 CONCLUSÕES

Pela análise estrutural da umidade do solo em sistema de irrigação por gotejamento em cultivo protegido, pode-se concluir que:

- a umidade do solo apresentou distribuição espacial anisotrópica;
- no sentido do comprimento da estufa, a dependência espacial foi de aproximadamente 3,30m;
- no sentido da largura da estufa, não foi possível ajustar modelos;
- apesar do CUD (coeficiente de uniformidade de distribuição) ser de 98%, utilizando a representação gráfica da superfície, observou-se maior teor de água na parte inicial e menor teor de água na parte final das linhas de distribuição de água;
- a krigagem foi um ótimo interpolador para mapeamento da umidade do solo em irrigação por gotejamento em cultivo protegido.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUFIRASSI, M., MARINO, M.A. Kriging of water levels in the Souss Aquifer, Morocco.

Math. Geol., v.15, p.537-50, 1983.

AGRAWAL, O.P., RAO, K.V.G.K., CHAUHAN, H.S., KHANDELWAL, M.K.

Geostatistical analysis of soil salinity improvement with subsurface drainage system.

Trans. Am. Soc. Agric. Eng., v.38, p.1427-33, 1995.

ALLI, M.M., NOWATZKI, E.A., MYERS, D.E. Probabilistic analysis of collapsing soil by

indicator kriging. *Math. Geol.*, v.22, p.15-38, 1990.

- ANTUNES, C.L. *Fertirrigação nitrogenada por gotejamento e época de aplicação foliar de ácido giberélico (GA₃) em alface americana (Lactuca sativa L.)*. Botucatu, 2001. 120p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.
- BERNARDO, S. *Manual de irrigação*. 6.ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1995. 657p.
- BORGELT, S.C., SEARCY, S.W., STOUT, B.A., MULLA, D.J. Spatially variable liming rates: a method for determination. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, v.37, p.1499-507, 1994.
- BOYER, D.G., WRIGHT, R.J., FELDHAKE, C.M., BLIGH, D.P. Soil spatial variability relationships in a steeply sloping acid soil environment. *Soil Sci.*, v.161, p.278-87, 1996.
- BRASIL. Ministério da Irrigação. Programa Nacional de Irrigação. *Tempo de irrigar: manual do irrigante*. São Paulo, 1987. 160p.
- BRESLER, E., DAGAN, G., WAGENET, R.J., LAUFER, A. Statistical analysis of salinity and texture effects on spatial variability of soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.48, p.16-25, 1984.
- BROOKER, P.I. Irrigation equipment selection to match spatial variability of soils. *Math. Comp. Modell.*, v.33, p.619-23, 2001.

- BROOKER, P.I., WINCHESTER, J.P. A geostatistical study of soil data from an irrigated vineyard near Waikerie, South Australia. *Environ. Int.*, v.21, p.699-704, 1995.
- BURDEN, D.S., SELIM, H.M. Correlation of spatially variable soil water retention for a surface soil. *Soil Sci.*, v.148, p.436-47, 1989.
- BURGESS, T.M., WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties, 1. The semi-variogram and punctual kriging. *J. Soil Sci.*, v.31, p.315-31, 1980.
- BURROUGH, P.A. Soil variability: a late 20th century view. *Soil Fertil.*, v.56, p.529-62, 1993.
- CAHN, M.D., HUMMEL, J.W., BROUER, B.H. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.58, p.1240-8, 1994.
- CAMBARDELLA, C.A., MOORMAN, T.B., NOVAK, J.M., PARKIN, T.B., KARLEN, D. L., TURCO, R.F., KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.58, p.1501-11, 1994.
- CARDIM, M. *Mapeamento do comportamento multivariado das principais variáveis climáticas de interesse agrícola do Estado de São Paulo*. Botucatu, 2001. 124p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

- CARVALHO, O.S., GASCÓ, J.M., LOPÉZ, F.G., REQUEJO, A.S. Variabilidade espacial de algumas propriedades químicas e físicas de um solo submetido a diferentes sucessões de cultivo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.22, p.497-503, 1998.
- CARVALHO, W.A., ESPINDOLA, C.R., PACCOLA, A.A. Levantamento de solos da Fazenda Lageado. *Bol. Cient. Fac. Ciên. Agron. (Botucatu)*, n.1, p.1-95, 1983.
- CASSEL, D.K., WENDROTH, O., NIELSEN, D.R. Assenssing spatial variability in an agricultural experiment station field: opportunities arising from spatial dependence. *Agron. J.*, n.92, p.706-14, 2000.
- CATANEO, A. Experimentação em ambiente protegido. In: FORO INTERNACIONAL DE CULTIVO PROTEGIDO, 1997, Botucatu. *Anais...Botucatu: UNESP/FAPESP*, 1997. p.129-53.
- CAVALCANTE, E.G.S. *Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de um latossolo vermelho-escuro sob diferentes condições de uso e manejo, em Selvíria (MS)*. Ilha Solteira, 1999. 199p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Sistemas de Produção) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.
- CHIEN, Y.J., LEE, D.Y., GUO, H.Y., HOUNG, K.H. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. *Soil Sci.*, v.162, p.291-8, 1997.

- CHRISTOFIDIS, D. Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo. *ITEM.*, v.49, p.8-13, 2001.
- CIOLLARO, G., ROMANO, N. Spatial variability of the hydraulic properties of a volcanic soil. *Geoderma*, v.65, p.263-82, 1995.
- CORA, J.E. *The potential for site-specific management of soil and corn yield variability induced by tillage.* Michigan, 1997. 104p. Dissertation (Doctor of Philosophy) - Michigan State University.
- CREMERS, N.H.D.T., VAN DIJK, P.M., ROO, A.P.J., VERZANDVOORT, M.A. Spatial and temporal variability of soil surface roughness and the application in hydrological and soil erosion modelling. *Hydrol. Processes*, v.10, p.1035-47, 1996.
- DAVIDOFF, B., SELIM, H.M. Correlation between spatially variable soil moisture content and soil temperature. *Soil Sci.*, v.145, p.1-10, 1988.
- DAVIS, B.M. Uses and abuses of cross-validation in geostatistics. *Math. Geol.*, v.19, p.241-8, 1987.
- DAVIS, J.G., HOSSNER, L.R., WILDING, L.P., MANU, A. Variability of soil chemical properties in two sandy dunal soils of niger. *Soil Sci.*, v.159, p.321-30, 1995.

- DELLA VECCHIA, P.T., KOCH, P.S. História e perspectivas da produção de hortaliças em ambiente protegido no Brasil. *Inf. Agropecu.*, v.20, n.200/201, p.5-10, 1999.
- DEUTSCH, C.V., JOURNEL, A.G. *GSLIB. geostatistical software library*. New York: Oxford Univ. Press, 1998.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de método de análises de solo*. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- ENGLUND, E., SPARKS, A. *Geo-EAS: users's guide*. Las Vegas: U.S. Environmental Monitoring Systems, 1988. não pag.
- FOLEGATTI, M.V. *Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade e do armazenamento de água em solo siltoso*. Piracicaba, 1996. 84p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- FREITAS, V.A. *Análise de dados espaciais por meio de variogramas*. Uberlândia, 2000. 32p. Dissertação (Matemática) – Faculdade de Matemática, Universidade Federal de Uberlândia.
- GOOVAERTS, P. *Geostatistics for natural resources evaluation*. New York: Oxford University Press, 1997. 650p.

- GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-art and perspectives. *Geoderma*, v.89, p.1-45, 1999.
- GOTO, R. Plasticultura nos trópicos: uma avaliação técnico-econômica. *Hortic. Bras.*, v.15, p.163-5, 1997.
- GS+. *GS+*. geostatistical for environmental sciences: version 5.0. Michigan: Gamma Design Software, 2000.
- GUERRA, P.A.G. *Geoestatística operacional*. Brasília: Ministério das Minas e Energia/Departamento Nacional de Pesquisa Mineral, 1988. 145p.
- GUPTA, R.P., AGGARWAL, P., CHAUHAN, A.S. Spatial variability analysis of bulk density as a guide for tillage. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, v.43, p.549-57, 1995.
- HOODA, P.S., DAHIYA, I.S., MALIK, R.S. Spatial variability of ground water salinity in a watershed. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, v.34, p.372-8, 1986.
- HORN, R., TAUBNER, H., WUTTKE, M., BAUMGARTL, T. Soil physical properties related to soil structure. *Soil Tillage. Reser.*, v.30, p.187-216, 1994.
- ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, M. *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989. 600p.

- JOURNEL, A.C., HUIJBREGTS, C.J. *Mining geostatistics*. London: Academic Press, 1978. 600p.
- KANE, V., BEGOVICH, C., BUTZ, T., MYERS, D.E. Interpretation of regional geochemistry. *Comput. Geosci.*, v.8, p.117-36, 1982.
- KRAVCHENKO, A.N., BULLOCK, D.G. A comparative study of interpretation methods for mapping properties. *Agron. J.*, v.91, p.393-400, 1999.
- LANDIM, P.M.B. *Análise estatística de dados geológicos*. São Paulo: Ed. UNESP, 1998. 226p.
- KLAR, A.E. O sistema solo-água. In: KLAR, A.E. *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. São Paulo: Nobel, 1984. p.57-81.
- LASLETT, G.M., MCBRATNEY, A.B. Estimation and implications of instrumental drift, random measurement error and nugget variance of soil attributes - a case study for soil pH. *J. Soil Sci.*, v.41, p.451-71, 1990.
- LEITE JÚNIOR, J.B. *Dessalinização do solo provocada pelo excesso do íon potássio em latossolo vermelho amarelo cultivado com alface americana (Lactuca sativa L.) irrigada sob ambiente protegido*. Botucatu, 2000. 80p. Dissertação (Mestrado em

Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

LEY, G.J., LARYEA, K.B. Spatial variability in penetration resistance of a hardsetting tropical Alfisol. *Soil & Tillage Res.*, v.29, p.367-81, 1994.

MALLANTS, D., MOHANTY, B.P., JACQUES, D., FEYEN, J. Spatial variability of hydraulic properties in a multi-layered soil profile. *Soil Sci.*, v.161, p.167-81, 1996.

MAROUELLI, W.A., SILVA, W.L.C. *Seleção de sistemas de irrigação para hortaliças*. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1998. 15p.

MARX, D.B., GILMOUR, J.T., SCOTT, H.D., FERGUSON, J.A. Effects of long-term water management in a humid region on spatial variability of soil chemical status. *Soil Sci.*, v.145, p.188-93, 1988.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Econ. Geol.*, v.58, p.1246-66, 1963.

MATOS, C.A.O., *Variabilidade espacial de Spodoptera frugiperda (J. E. Smith, 1797, Noctuidae) no milho: métodos geoestatísticos e de estatística clássica*. Botucatu, 2000. 72p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Proteção de Plantas) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

- McBRATNEY, A.B., WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties. *Soil Sci.*, v.135, p.177-83, 1983.
- MELLO, C.M. *Variabilidade espacial de atributos de um nitossolo vermelho distrófico de Botucatu/SP*. Botucatu, 2001. 56p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- MOOLMAN, J.H., HUYSSTEEN, L.V. A geostatistical analysis of the penetrometer soil strength of a deep ploughed soil. *Soil Tillage Res.*, v.15, p.11-24, 1989.
- MYERS, D.E. Interpolation and estimation with spatially located data. *Intell. Lab. Syst.*, v.11, p.209-28, 1991.
- MYERS, J.C. *Geostatistical error management: qualifying uncertainty for environmental sampling and mapping*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1997. 571p.
- NETTO, A.M., PIERITZ, R.A., GAUDET, J.P. Field study on the local variability of soil water content and solute concentration. *J. Hidrol.*, v.215, p.23-37, 1999.
- NIELSEN, D.R., BIGGAR, J.W., ERH, K.T. Spatial variability of field-measured soil-water properties. *Hilgardia*, v.42, p.215-60, 1973.

NIELSEN, D.R., TILLOTSON, P.M., VIEIRA, S.R. Analyzing field-measured soil-water properties. *Agric. Water Manag.*, v.6, p.93-109, 1983.

OLITTA, A.F.L. *Os métodos de irrigação*. São Paulo: Nobel, 1981. 267p.

OLIVEIRA, J.J., CHAVES, L.H.G., QUEIROZ, J.E. LUNA, J.G. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.23, p.783-9, 1999.

PUENTES, R., WILDING, L.P., DREES, L.R. Microspatial variability and sampling concepts in soil porosity studies of Vertisols. *Geoderma*, v.53, p.373-85, 1992.

QUEIROZ, J.E., GONÇALVES, A.C., SOUTO, J.S., FOLEGATTI, M.V. Avaliação e monitoramento da salinidade do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26, 1997, Campina Grande. *Anais...* Campina Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1997. p.69-111.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.12, p.211-6, 1988.

REICHARDT, K. O solo como um reservatório de água. In: __. *A água em sistemas agrícolas*. Piracicaba: Manole, 1990. p.27-69.

REICHARDT, K., KIRDA, C., ZAPATA, F. HARDARSON, G., AXMANN, H. Evaluation of soil-water and plant nitrogen status by nuclear techniques. In: PROCEEDINGS OF THE REGIONAL WORKSHOP ON NUCLEAR TECHNIQUES IN CROP PRODUCTION. Piracicaba: CENA, 1984. p.239-246.

REICHARDT, K., VIEIRA, SR., LIBARDI, P.L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.10, p.1-6, 1986.

RIBEIRO JÚNIOR, P.J. *Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo*. Piracicaba, 1995. 99p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Estatística e Experimentação Agronômica) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

ROGOWSKI, A.S., WOLF, J.K. Incorporating variability into soil map unit delineations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.58, p.163-74, 1994.

SALES, L.E.O. *Variabilidade espacial da velocidade de infiltração básica associada a propriedades físicas das camadas superficial e subsuperficial de dois solos da Região de Lavras (MG)*. Lavras, 1992. 104p. Dissertação (Mestrado/Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura de Lavras.

- SALVIANO, A.A.C., VIEIRA, S.R., SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* (L.) em área severamente erodida. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.22, p.115-22, 1998.
- SAMRA, J.S., GILL, H.S., ANLAUF, R., RICHTER, J. Geostatistical evaluation of soil sodicity and growth of *Melia azedarach* Linn. as simultaneous stochastic processes. *Soil Sci.*, v.148, p.361-9, 1989.
- SAN JUAN, J.A.M. *Riego por goteo teoría y práctica*. 2.ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1985. 216p.
- SANCHEZ, R.B. *Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de latossolos em diferentes superfícies geomórficas sob cultivo de café, em Patrocínio, MG*. Jaboticabal, 1999. 79p. Dissertação (Graduação em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista.
- SGANZERLA, E. *Nova agricultura: a fascinante arte de cultivar com os plásticos*. 6.ed. Guaíba: Agropecuária, 1997. 342p.
- SILVA, W.L.C., MAROUELLI, W.A. Manejo da irrigação em hortaliças no campo e em ambientes protegidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. *Anais...* Poços de Caldas: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. p.311-48.

SIQUEIRA, C.E.M. A importância dos materiais plásticos na agricultura do Brasil e do mundo. In: ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS AGRÔNOMOS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Programa de plasticultura para o Estado de São Paulo*. São Paulo: Associação de Engenheiros Agrônomos do Estado de São Paulo, s.d. p.6-8.

SISSON, J.B., WIERENGA, J. Spatial variability of steady-state infiltration rates as a stochastic process. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.45, p.699-704, 1981.

SOARES, J.M., COSTA, F.F., SANTOS, C.R. Manejo de irrigação em fruteiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. *Anais...* Poços de Caldas: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. p.281-309.

SOUSA, V., PEREIRA, L.S. Regional analysis of irrigation water requirements using kriging application to potato crop (*Solanum tuberosum* L.) at Trás-os-Montes. *Agric. Water Manag.*, v.40, p.221-33, 1999.

SOUZA, L.S., COGO, N.P., VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.21, p.367-72, 1997.

TABOR, J.A., WARRICK, A.W., PENNINGTON, D.A., MYERS, D.E. Spatial variability of nitrate in irrigated cotton: I. Petioles. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.48, p.602-7, 1984.

- TAKEDA, E.Y. *Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de uma associação de solos sob a videira (Vitis vinífera, L.) em Vitória Brasil-SP*. Ilha Solteira, 2000. 102p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Sistemas de Produção) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.
- TIVELLI, S.W. Manejo do ambiente em cultivo protegido. In: GOTO, R., TIVELLI, S.W. *Produção de hortaliças em ambiente protegido: condições subtropicais*. São Paulo: UNESP, 1998. p.15-30.
- TRANGMAR, B.B., YOST, R.S., UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.*, v.38, p.45-94, 1985.
- UTSET, A., CASTELLANOS, A. Drainage effects on spatial variability of soil electrical conductivity in a vertisol. *Agric. Water Manag.*, v.38, p.213-22, 1999.
- VALENTE, J.M.G.P. *Geomatemática: lições de geoestatística*. Ouro Preto: Ed. da Fundação Gorceix, 1989. 8v.
- VIEIRA, S.R. *Curso de atualização em conservação do solo: uso de geoestatística*. Campinas: Seção de Conservação do Solo, Instituto Agrônomo de Campinas, 1995. 2v.
- VIEIRA, S.R., CASTRO, O.M., TOPP, G.C. Spatial variability of soil physical properties in three soils of São Paulo, Brazil. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, v.27, p.333-41, 1992.

- 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, p.1-75, 1983.
- VIEIRA, S.R., TILLOTSON, P.M., BIGGAR, J.W., NIELSEN, D.R. Scaling of semivariograms and the kriging estimation of field-measured properties. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.21, p.525-33, 1997.
- VOLTZ, M., GOULARD, M. Spatial interpolation of soil moisture retention curves. *Geoderma*, v.62, p.109-23, 1994.
- WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Adv. Soil Sci.*, v.3, p.1-70, 1985.
- WEBSTER, R., OLIVER, A. Sample adequately to estimate variograms of soil properties. *J. Soil Sci.*, v. 43, p.177-92, 1992.
- YOST, R.S., UEHARA, G., FOX, R.L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. II. Kriging. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.46, p.1033-7, 1982.
- ZAMBOTI, J.L. *Mapas pluviométricos médios mensais no verão para o Estado do Paraná, utilizando métodos geoestatísticos*. Botucatu, 2001. 134p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

ZHANG, R., RAHMAN, S., VANCE, G.F., MUNN, L.C. Geostatistical analyses of trace elements in soils and plants. *Soil Sci.*, v.159, p.383-90, 1995.

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

ZIMMERMAN, D.L. Another look at anisotropy in geostatistics. *Math. Geol.*, v.25, p.453-70, 1993.