**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Utilização da técnica de co-krigagem com inclinação máxima e altitude do terreno no delineamento de zonas de manejo: granulometria do solo e disponibilidade hídrica

Sérgio Ricardo Rodrigues de Medeiros

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Ciências. Área de concentração:
Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2012**

Sérgio Ricardo Rodrigues de Medeiros
Engenheiro Agrônomo

**Utilização da técnica de co-krigagem com inclinação máxima e altitude do terreno no
delineamento de zonas de manejo: granulometria do solo e disponibilidade hídrica**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2012**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Medeiros, Sérgio Ricardo Rodrigues de

Utilização da técnica de co-krigagem com inclinação máxima e altitude do terreno no delineamento de zonas de manejo: granulometria do solo e disponibilidade hídrica / Sérgio Ricardo Rodrigues de Medeiros. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2012.

98 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Atitudes 2. Granulometria do solo 3. Hidrogeologia 4. Inclinação máxima
5. Krigagem I. Título

CDD 631.411
M488u

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

A minha família,

Meus pais João e Risolene que com o amor incondicional dos mesmos, sou o que sou. Aos meus irmãos Silvana, Sílvio, Shara e Sayonara. Minha sobrinha Maria Clara e minhas avós Maria Costa e Maria Marques (in memorian).

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Criador, pela vida.

Aos meus pais, João Medeiros e Risolene Maria, meus irmãos Silvana, Sílvio, Shara e Sayonara, pelos momentos de alegria, força e incentivo em cada momento de minha vida.

Ao professor orientador, Dr. Rubens Duarte Coelho, por suas contribuições na orientação e revisão do trabalho, confiança, paciência e incentivo em todos os momentos.

A instituição Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), através do Departamento de Engenharia de Biosistemas e do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, o qual disponibilizou estrutura física e intelectual para a realização da tese.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa de estudos.

Aos professores Sérgio Nascimento, Tarlei Botrel, Carlos Alberto Vettorazzi, Rubens Angulo e Peterson Fiorio e aos demais professores do Departamento.

Aos funcionários Gilmar, Paula Bonassa, Luís, Hélio, Antônio, Juarez, Áureo, Davilmar e Lúcia Monteiro, pelos momentos de convivência, apoio e serviços prestados.

Um agradecimento especial aos meus amigos Fernando Barbosa (maninho), Rafael Mingoti e Jefferson Vieira, sem os quais, ficaria mais difícil de desenvolver a pesquisa e principalmente pela amizade.

Aos amigos Pedro Giongo, Juliano Martins, Angelina, Isaac Ponciano, Marina, Cléo, Aérica, Amerivan, Diana, Magnus e Dinara pelos momentos de amizade, apoio e descontração.

Aos colegas de orientação: Rafael Maschio, Lucas Faria, Renato, Robson Mauri, Daniel e Eusímio e aos demais colegas do Departamento.

Aos amigos de convívio de república: Marinaldo e Cristiano, pela amizade e companheirismo.

Aos meus amigos da Pró-Vida, que com filosofia, me incentivaram a vencer os obstáculos que apareceram no decorrer do caminho.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização do meu doutorado e da tese aqui apresentada.

Um dia me perguntaram:
Se você pudesse voltar no tempo o que você faria?
No primeiro momento pensei,
pensei mais uma vez
e respondi:
Possivelmente faria a mesma coisa,
pois me colocaria na mesma condição,
de aprendiz.

Sérgio Medeiros

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTAS DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	17
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	19
LISTA DE SÍMBOLOS	21
1 INTRODUÇÃO	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 Geoestatística	29
2.1.1 Histórico e Teoria das Variáveis Regionalizadas.....	29
2.1.2 Hipóteses	30
2.1.3 Variograma.....	31
2.1.4 Krigagem.....	35
2.1.5 Cokrigagem	37
2.1.5.1 Variograma cruzado	37
3 MATERIAL E MÉTODOS	40
3.1 Caracterização da Área Experimental	40
3.1.1 Localização.....	40
3.1.2 Caracterização Climática.....	41
3.1.3 Modelo Numérico de Elevação (MNE)	41
3.1.3.1 Plano de informação de Declividade (Relevo).....	43
3.1.3.2 Plano de direção do fluxo e fluxo acumulado (Rede natural hidrológica).....	43
3.1.4 Solo.....	45
3.2 Amostragem	48
3.3 Determinação dos atributos físicos do solo.....	49
3.3.1 Frações granulométricas.....	49

3.3.2 Densidade do solo	50
3.4 Estimativa das umidades na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente para a utilização das equações de pedotransferência	50
3.5 Análise Exploratória dos dados.....	52
3.6 Análise do Grau de dependência espacial	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1 Análise espacial das frações granulométricas na camada 0 a 30 cm, das correlações da areia com a altitude e com a inclinação máxima e correlação da argila+silte com a CAD na área do pivô da Fazenda.....	57
4.1.1 Variogramas das frações granulométricas.....	58
4.1.2 Cokrigagem entre os parâmetros através do variograma cruzado entre areia versus altitude e areia versus inclinação máxima na densidade amostral 20x20m e 40x40m, respectivamente.....	59
4.1.3 Análise do variograma cruzado entre areia versus altitude e areia versus inclinação máxima na densidade amostral 20x20m.	60
4.1.4 Análise do variograma cruzado entre areia versus altitude e areia versus inclinação máxima na densidade amostral 40x40m.	60
4.1.5 Mapas gerados dos variogramas das frações granulométricas.....	62
4.1.6 Mapas gerados dos variogramas cruzados da fração areia versus a inclinação máxima e da fração areia versus altitude para as densidades amostrais 20x20 e 40x40m.....	64
4.1.7 - Análise da correlação entre CAD e o teor de argila+silte.....	65
4.1.8 - Análise do variograma cruzado entre a fração argila+silte e a CAD na área do pivô	65
4.1.9 Mapa do pivô gerado do variograma cruzado da CAD (30 cm de profundidade) e a fração argila+silte.....	66
5 CONCLUSÕES.....	67
REFERÊNCIAS	68
ANEXOS.....	73

RESUMO

Utilização da técnica de cokrigagem com inclinação máxima e altitude do terreno no delineamento de zonas de manejo: granulometria do solo e disponibilidade hídrica

No Brasil pouco se estuda sobre as estratégias de amostragem em áreas com mais de um tipo de solo e várias feições de paisagem, estratégias estas, importantes para mapear a variabilidade espacial dos atributos físicos: frações granulométricas, como também a correlação destas com os parâmetros geomorfológicos: altitude e inclinação máxima da área amostrada da extensão multivariada da krigagem, a cokrigagem. Essa extensão multivariada permite a associação de duas variáveis dependentes gerarem novas informações correlacionadas através do modelo de variância cruzada. O objetivo deste trabalho foi avaliar a correlação espacial entre a distribuição da fração granulométrica com os parâmetros de altitude e a inclinação máxima através de uma densidade amostral agregada (100x100 e 50x50m) com dois níveis de densidade amostral, 20x20 e 40x40m. O estudo se deu numa área de 180 ha, onde se coletou frações de solo numa grade amostral agregada, ou seja, um arranjo amostral 100x100m e três sub-grades de 50x50m distribuídas aleatoriamente na área. Foi realizada análise estatística descritiva dos dados processados no laboratório e a análise espacial através de modelos de variância. De posse dos modelos ajustados na análise dos variogramas, realizou a interpolação pela krigagem para as frações granulométricas e através dos variogramas cruzados pela cokrigagem, as correlações dessas frações com os dados, obtidos pelo modelo digital de elevação, da altitude e a inclinação máxima do terreno da área e comparada, através dos mapas, essas mesmas correlações em densidades amostrais diferentes. A partir dos modelos de mapas gerados, chegou aos seguintes resultados: houve uma moderada variabilidade das frações granulométricas e uma moderada dependência espacial. De acordo com os parâmetros da variância cruzada a distribuição espacial da fração areia correlacionada com a altitude e com a inclinação máxima não diferenciou significativamente em relação aos níveis de densidade amostral 20x20m e 40x40m, praticamente não houve correlação entre a fração areia e a altitude, pois não apresentou um padrão definido de distribuição espacial. Pode-se concluir que a declividade influenciou na distribuição dos atributos físicos do solo. Como também foi avaliada a disponibilidade hídrica na área do pivô da Fazenda, foi constatada a forte correlação do atributo argila+silte com a capacidade de água disponível (CAD), enfatizando a dependência da disponibilidade hídrica em relação aos atributos físicos do solo.

Palavras-chave: cokrigagem; variograma; Altitude; Inclinação máxima

ABSTRACT

Using the technique of cokriging with maximum slope of the terrain and altitude in the delineation of management zones: grain size and soil water availability

In Brazil, few studies are related about soil sampling strategies in areas with more than one type soil and various features of the landscape, these strategies are important to map the spatial variability of physical attributes: size fractions, as well as the correlation of these with geomorphologic parameters: altitude and maximum slope of the sampled area of the multivariate extension of kriging, cokriging. This extension allows multivariate combination of two dependent variables to generate new information correlated with the model cross variance. The objective of this study was to evaluate the spatial correlation between the distribution of particle size fraction with the parameters of altitude and terrain slope through a maximum aggregate sample density (100x100 and 50x50m) with two levels of sample density, 20x20 and 40x40m. The study was an area of 180 ha, where fractions of collected soil at a sampling grid aggregate, ie an arrangement 100x100m sample and three sub-grids 50x50m randomly distributed in the area. We performed a descriptive statistical analysis of data processed in the laboratory and spatial analysis through models of variance. In possession of the adjusted models in the analysis of variogram for kriging interpolation performed for the fractions and through the variogram crossed by cokriging, the correlations of these fractions with the data obtained by digital elevation model, altitude and the maximum slope of the land area and compared, through maps, these same correlations in different sampling densities. From the models generated maps, it was reached the following results: there was a moderate variability in size fractions and a moderate spatial dependence. In accordance with parameters of cross (semi)variance the spatial distribution of the sand fraction correlated with altitude and the maximum slope did not differ significantly from the levels of sample density 20x20m and 40x40m, virtually no correlation between the sand fraction and altitude because it did not show a definite pattern of spatial distribution. It can be concluded that the slope influenced the distribution of soil physical attributes studied. It was also quantified the water availability in the area under the center pivot equipment, it was found a strong correlation of the attribute clay + silt with TAW (total available water), emphasizing the dependence on water availability in relation to soil physical properties.

Keywords: Cokriging; (semi)variogram; Altitude; Maximum slope

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 -	Representação gráfica de um variograma típico e seus componentes.....	33
Figura 2 -	Representação visual do princípio de estimativa dos interpoladores para inferir valores, de uma variável distribuída no espaço, em locais não amostrados. Fonte: Adaptado do INPE - Divisão de Processamento de Imagens (2000).....	36
Figura 3 -	Área efetiva do estudo da Fazenda Areão, área experimental da ESALQ-USP/Piracicaba-SP.....	40
Figura 4 -	Modelo numérico de elevação da área da fazenda Areão, área experimental da ESALQ-USP/Piracicaba-SP.....	41
Figura 5 -	Plano de informação de declividade (Clinográfico) plano e em perspectiva.....	43
Figura 6 -	Planos de informação direção de fluxo da área.....	44
Figura 7 -	Plano de informação: fluxo acumulado de água superficial.....	45
Figura 8 -	Representação esquemática dos solos classificados da fazenda Areão segundo o Relatório de apresentação do diagnóstico para a elaboração do plano diretor socioambiental participativo do campus “Luiz de Queiroz”, Piracicaba/SP (2006).....	46
Figura 9 -	Distribuição das amostras na Fazenda Areão.....	48
Figura 10 -	Variogramas da fração argila (A), silte (B), areia (C), argila+silte (D) na profundidade de 0 - 0,30m.....	58
Figura 11 -	Variograma cruzado da areia versus altitude (A), areia versus inclinação máxima no ponto amostral (B).....	59
Figura 12 -	Variograma cruzado da areia versus altitude (A), areia versus inclinação máxima no ponto amostral (B).....	60
Figura 13 -	Concentração do teor de argila (A), teor de silte (B), teor de areia (C), teor de silte+argila (D) pelo método de interpolação da krigagem	62

- Figura 14 - Distribuição da fração areia versus a inclinação máxima na densidade amostral 20x20m (A) e na densidade amostral 40x40m (B), distribuição da fração areia versus a altitude na densidade amostral 20x20m(C), e na densidade amostral 40x40m (D) pelo método de interpolação da cokrigagem.....64
- Figura 15 - Correlação do teor de argila+silte e a CAD.....65
- Figura 16 - Variograma cruzado da areia versus altitude (A), areia versus inclinação máxima no ponto amostral.....65
- Figura 17 - Mapa da CAD espacializada em relação a fração argila+silte.....66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Valores representativos da análise granulométrica de algumas amostras de solos respectivas as classes de solo amostradas na área experimental nas camadas superficiais (0 - 0,30m).....	49
Tabela 2 -	Estatística descritiva e teste de normalidade das variáveis argila, silte, areia e argila+silte para a camada de 0 a 0,30m.....	55
Tabela 3 -	Parâmetros, índice de dependência espacial (IDE%), modelos teóricos ajustados dos variograma simples e variograma cruzado dos atributos.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	Alumínico
Bt	Horizonte B textural
CAD	Capacidade de água disponível
CC	Capacidade de campo
CV	Coeficiente de variação
Cwa	Clima “tropical de altitude”
D	Distrófico
dg	densidade global
E	Eutrófico
GPS	Global Position Systems (Sistema de posicionamento global)
ha	hectare
IDE	Índice de dependência espacial
MDE	Modelo digital de elevação
N	Número de observações
P	profundidade
S	Sul
SAD 69	South American Datum (Sistema geodésico para América do Sul)
SQR	Soma dos Quadrados dos Resíduos
Tb	Alta atividade da fração argila no solo
UTM	Universal Transverse Mercator (Sistema de coordenadas)
W	Oeste

LISTA DE SÍMBOLOS

$A(m)$	Alcance efetivo
A_0	Alcance teórico
$^{\circ}C$	Graus centígrados
C	Variância estrutural
C_0	efeito pepita
$C_0 + C$	Patamar
g/cm^3	gramas por centímetro cúbico
cm	centímetros
m	metros
mm	milímetros
h	Distância
x_i	Amostra local
Z_1	Amostra primária
Z_2	Amostra secundária
λ	Lâmbda (coeficiente de transformação)
$< e >$	menor e maior que

1 INTRODUÇÃO

A variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo está relacionada com variação das propriedades do solo dentro das unidades taxonômicas e/ou do mapeamento de solos. A mesma variabilidade espacial pode ser agrupada em duas categorias: variabilidade sistemática e variabilidade aleatória. A variabilidade sistemática é uma mudança gradual ou acentuada das propriedades do solo em função da paisagem, aspectos morfológicos, fatores de formação e/ou do próprio manejo do solo pelo homem. A variabilidade aleatória constitui-se nas mudanças das propriedades do solo que não podem ser relacionadas a uma causa conhecida podendo ser em decorrência de diversos fatores como: intensidade do intemperismo, erosão, fatores biológicos, erros analíticos e de amostragem.

É importante entender como a variabilidade espacial dos atributos do solo correlacionados com os parâmetros geomorfológicos: altitude e a inclinação máxima do terreno podem influenciar na qualidade (resolução) dos mapas de distribuição espacial dos atributos físicos do solo, podendo minimizar as incertezas na interpretação dos dados espacializados e no custo de amostragem desses dados através de técnicas geoestatísticas.

Uma análise detalhada de quaisquer atributos do solo demanda custos e tempo relativamente elevados, principalmente em grandes áreas heterogêneas. Por esse motivo, costuma-se aplicar métodos estatísticos de interpolação espacial para obter informações sobre quaisquer características das propriedades dos solos em locais não amostrados, visando diminuir o número de amostras necessárias para um bom mapeamento da área. Assim sendo, a utilização da técnica de interpolação que permite estabelecer modelos de (semi)variogramas, que auxiliam no entendimento da variabilidade dos atributos de interesse através da dependência espacial dos dados numa superfície contínua.

Muitos trabalhos já foram realizados na perspectiva de mapas de variabilidade dos atributos físico-hídricos em escalas menores com um único tipo de solo, já em escala maior e com vários tipos de solos, pouco tem sido feito, e aqui vale ressaltar a necessidade de estudar essa variabilidade em áreas mais heterogêneas, através dos modelos de interpolação. Desses modelos, um dos mais tradicionais é a krigagem, modelo que faz inferência a uma única variável, ou seja, de um atributo “Z” e utiliza somente valores amostrados desse atributo, desconsiderando outras variáveis, que possivelmente poderiam melhor caracterizar o atributo “Z”.

Na busca de uma melhor representatividade da variabilidade dos atributos do solo, tanto em áreas pequenas e grandes escalas, que podem ter um tipo ou vários tipos de solo, faz-se o uso de uma modelagem de interpolação espacial mais sofisticada, como a co-krigagem, que considera a correlação espacial cruzada, integrando uma variável primária (Z) com uma secundária (Z_2) reduzindo assim as incertezas em relação à qualidade da representação da distribuição espacial do(s) atributo(s) de interesse. Em geral, quando a quantidade de amostras da variável primária é escassa (ou insuficiente) para o nível de qualidade esperado para o modelo de decisão, quando o custo de obtenção de mais amostras da variável primária é alto ou inviável e quando há disponibilidade, a um custo baixo, de informação secundária que tenha um grau de correlação com a variável primária, o uso da informação secundária no procedimento inferencial melhora os resultados do modelo de interpolação.

Pelas discussões levantadas, há uma necessidade de averiguação do comportamento na distribuição das frações granulométricas em relação às variáveis secundárias: a altitude e a inclinação máxima, dados gerados pelo modelo digital de elevação.

Através da correlação das variáveis secundárias de alta densidade com as primárias de baixa densidade amostral, atendida pela condição da relação espacial entre as mesmas, poderá se constatar um comportamento espacial diferenciado dos teores das frações granulométricas quando cruzados com outras informações de fácil acesso.

Parte-se da hipótese que as variáveis de altitude e a inclinação, quando correlacionadas com as frações granulométricas através da técnica da co-krigagem, possam influenciar no delineamento de zonas de manejo para densidades amostrais distintas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A qualidade estrutural do solo tem sido associada às condições físicas favoráveis ao desenvolvimento radicular, aeração, infiltração e movimento de água no perfil do solo. As principais alterações são evidenciadas pelo aumento da densidade do solo, redução da aeração e por consequência, modificações na disponibilidade e fluxo de água. A análise de dados obtidos em condições de campo tem apresentado dificuldade nas diversas áreas da ciência agrícola para a produção de mapas de caracterização do solo, devido à variabilidade espacial.

Minasny & Hartemink (2011) indicam que os fatores de formação dos atributos do solo são mais intensos nas regiões tropicais, e isso claro, interfere na grande variabilidade das características do solo na região. Muitos dos solos nos trópicos foram formados pela erosão superficial e deposição de sedimentos durante o período Pré-cambriano (SANCHEZ E BUOL, 1975). Como resultado, muitos dos solos são intensamente intemperizados. Sabe-se muito menos sobre os solos nos trópicos do que sobre os solos das regiões temperadas e isso se deve principalmente devido à falta de pesquisas (HARTEMINK, 2002).

Quando se trata da variabilidade dos atributos do solo, as dificuldades tornam-se ainda maiores, porque, sendo a formação do solo resultante de uma série de fatores, o produto final é bastante heterogêneo em relação às suas características e propriedades. Fatores estes, que estão relacionados ao material de origem, e este pode depender do ambiente deposicional dos sedimentos, do tipo de rocha que originou o solo e de processos pedogenéticos (DANIELS e NELSON, 1987). Além do material de origem, o relevo influencia a variabilidade da textura, uma vez que condiciona o tempo de exposição dos materiais à ação do intemperismo.

O relevo e o material de origem atuam no controle local sobre o movimento de água, teor de nutrientes e temperatura do solo (WYSOCKI e SCHOENEGER, 1999). Esses autores asseguram que nos últimos anos, houve um grande avanço no conhecimento do solo como um sistema dinâmico, decorrente dos estudos do movimento de água superficial e subsuperficial, possibilitando o entendimento dos solos como agente integrador da paisagem. Nesse sentido, os processos que ocorrerem no topo da paisagem afetam os demais solos na vertente, em razão dos fluxos de energia e massa dos solos (forças que favorecem a pedogênese) que integram os processos de transporte e sedimentação (WILDING e DREES, 1983).

Existem pesquisas que enfocam a variabilidade espacial das propriedades dos solos, sejam físicas, químicas e hídricas, resultados de pesquisas de grande relevância como subsídio para o manejo racional de água e solo em perímetros irrigados. Tais variações espaciais são decorrentes das taxas variáveis nas quais atuam os processos de formação do solo e das diversas atuações antrópicas durante seu cultivo (CICHOTA et al. 2003; REICHARDT e TIMM, 2004). No que diz respeito a atributos físicos, Eguchi et al. (2002) comentam que a textura e a densidade de partículas são consideradas elementos de grande importância na identificação e na classificação do solo, pois se constituem em características físicas de elevada estabilidade. De acordo com Journel e Huijbregts (1978), a variação espacial de atributos físicos do solo não ocorre de modo aleatório, mas sim segundo uma estrutura de dependência espacial, que deve ser investigada e incorporada aos processos de mapeamento.

Os teores de areia, argila e silte se caracterizam por apresentar uma forte dependência espacial, segundo Cambardella et al. (1994), a ocorrência da dependência espacial na camada superficial pode estar associada ao preparo do solo convencional, onde os equipamentos de preparo (arado e grade) movimentam demasiadamente a camada superior, afetando sua estrutura original, e tornando pontos próximos entre si mais semelhantes que os mais distantes. Avaliando um transecto de 100m com 51 pontos amostrais em solo aluvial, Eguchi et al. (2002) encontraram dependência espacial significativa para as frações areia, argila e silte, confirmando a afirmação de Cambardella et. al. (1994), e atribuíram os resultados principalmente às contribuições presentes na formação do solo.

O conhecimento da textura é importante para definir classes taxonômicas (WEBSTER e BUTLER, 1976), inferir os processos pedogenéticos atuantes (YOUNG e HAMER, 2000), prever as necessidades de práticas conservacionistas essenciais para o planejamento ambiental (BOUMA et al., 1999) e ainda auxiliar no entendimento do movimento de água no corpo do solo.

A textura é de particular importância, uma vez que a interação água - solo depende da composição granulométrica, particularmente da fração argila. Gonçalves et. al.(2001) avaliaram as propriedades físicas (frações granulométricas), através de uma amostragem aleatória, de forma que os valores medidos permitiram inferir sobre os valores médios em toda a área. No entanto, constatou que o procedimento não considerava uma possível estrutura de variabilidade espacial, o que pode levar a erros. Assim, descreveram a distribuição espacial dos valores das frações granulométricas e avaliaram a importância da análise exploratória dos dados. Os valores obtidos para frações granulométricas, após a remoção de tendências, permitiu construir variogramas e, por meio da análise destes, constataram que uma análise

criteriosa e exploratória preliminar é de fundamental importância antes de se construir e interpretar os variogramas. Fizeram uso de técnicas de análise exploratória e de tratamento dos dados, permitindo verificar que os conteúdos de argila, silte e areia do solo apresentaram uma estrutura de dependência espacial na área estudada. Chegaram à conclusão que embora as frações granulométricas apresentassem uma tendência de variação ao longo da área estudada, a remoção da mesma não alterou significativamente os variogramas para silte e para areia, mas alterou expressivamente o variograma para argila. Constataram também que o escalonamento dos variogramas dos resíduos permitiu constatar que as frações argila e areia apresentam estruturas de variação no espaço que podem ser descritas por um único modelo de variograma.

O estudo das propriedades físicas do solo correlacionadas com as propriedades hídricas oferece informações mais seguras para a prática do gerenciamento da água aplicada no solo. Babalola (1978) citado por Gonçalves et. al. (2001) salientou que a alta variabilidade das propriedades físicas do solo, tais como o conteúdo de areia, argila e silte, bem como da densidade global, resultam em alta variabilidade nas características de retenção de água pelo solo. Gonçalves et al. (1999) estudaram a variabilidade temporal da umidade do solo e verificaram que essa não se distribui de forma aleatória na área, possuindo dependência espacial bem definida. Dessa forma, torna-se importante o conhecimento de como se comportam estes atributos, onde se pretende ter conhecimento e controle da dinâmica da água no solo, como por exemplo, em uma área de perímetro irrigado.

Blaszczynski (1997) estudando o movimento da água no solo, constatou que o movimento da água é condicionado pela variabilidade dos atributos químicos, físicos, biológicos e mineralógicos do solo. Todavia, sabe-se que o relevo e suas formas também influenciam nas diferentes direções dos fluxos de água, esta, por sua vez, infere na distribuição das frações granulométricas numa área. As informações sobre altitude, declividade e fluxo do escoamento superficial acumulado são dados importantes para introduzir um caráter determinístico na avaliação dos mapas elaborados através da técnica da geoestatística, dentro de preceitos estocásticos (McBRATNEY et al., 2003).

De posse dos dados das características geomorfológicas, da distribuição dos teores das frações granulométricas na área a ser estudada, a produção de mapas de distribuição espacial dos atributos físico e/ou hídricos do solo, por meio da predição dos seus valores, poderá ser feita por meio de diferentes métodos de interpolação, sendo os métodos geoestatísticos mais

eficientes (GOOVAERTS, 1997), pois analisa a variabilidade espacial do solo (vertical e horizontalmente) considerando a dependência espacial entre as amostras.

Interpretando a relação da distribuição espacial de atributos do solo com o relevo, podem ser obtidas informações para o entendimento da relação entre geomorfologia, dinâmica da água e atributos do solo. Sarnaglia et. al. (2010) avaliaram e relacionaram a distribuição espacial das frações granulométricas do solo com o relevo. Foram realizadas análises estatísticas e geoestatísticas dos teores de areia grossa, areia fina, silte e argila de 104 amostras georreferenciadas e coletadas na profundidade de 0-10 e 10-20 cm. Somente as frações areia grossa e argila apresentaram dependência espacial para posterior interpolação pela krigagem ordinária. A partir dos resultados pôde-se observar que o relevo influenciou na distribuição das frações granulométricas do solo e regiões de maior estabilidade (menor relação morfogênese/pedogênese), ou seja, de menor fluxo do escoamento superficial e de menor declividade, apresentaram maiores teores de argila. Em contrapartida, nas regiões onde o fluxo acumulado do escoamento superficial e a declividade foram mais elevados, ou seja, regiões com maior relação morfogênese/pedogênese foram observadas maiores teores da fração areia grossa.

A partir dos resultados citados acima, Burak e Passos (2011) chegaram a resultados semelhantes a Sarnaglia (2010), confirmando que o relevo realmente influencia na distribuição dos atributos físicos do solo. Regiões de maior estabilidade, ou seja, de menor fluxo do escoamento superficial e de menor declividade, apresentam maiores teores de argila e menores valores de macroporosidade. Em contrapartida, nas regiões onde o fluxo acumulado do escoamento superficial e a declividade são mais elevados, são observados maiores teores da fração areia grossa e macroporosidade. Esse fato está relacionado à maior perda de argila, mais facilmente transportada, e ao enriquecimento residual da areia grossa, que ocorrem principalmente na parte inferior do segmento da paisagem estudada.

Embora não seja o objeto de estudo do presente trabalho, os atributos físicos também podem influenciar na parte química do solo. Souza et. al. (2008) analisaram os atributos físicos e a salinidade de solos em uma área aluvial irrigada no semi-árido de Pernambuco, com o objetivo de avaliar a dependência espacial das frações granulométricas e da condutividade elétrica do extrato de saturação. Foi desenvolvido um estudo em que constataram uma forte dependência espacial entre as frações granulométrica (areia, argila e silte) e moderada para a condutividade elétrica, com alcances de 56, 50, 55 e 35m, respectivamente. Quando correlacionada a condutividade elétrica com o teor de silte,

apresentou uma forte correlação espacial, com alcance de 52m para o variograma cruzado. Os resultados ressaltam a importância da fração silte na distribuição espacial da salinidade, bem como na relevância para o manejo racional do solo estudado.

2.1 Geoestatística

O modelo geoestatístico de uma série de variáveis geológicas (teores, densidade, potência de camadas etc.), quando observadas, apresentam características interessantes, onde cada observação está associada a um ponto bem definido no espaço (por suas coordenadas x,y,z) e existem variações espaciais mais ou menos evidentes no domínio considerado; quando observadas a pequena escala, estas variações apresentam-se aparentemente caóticas, como se fossem totalmente aleatórias, no entanto, pode-se notar um comportamento médio, mais ou menos bem definido para estas variações, ou seja, existe uma certa estrutura espacial que caracteriza a variável considerada. A estas variáveis deu-se o nome de variáveis regionalizadas (VR) (GRIPP, 1992).

2.1.1 Histórico e Teoria das Variáveis Regionalizadas

A Geoestatística teve as suas primeiras aplicações em mineração (BLAIS e CARLIER, 1968). Segundo Vieira (2000), surgiu quando Krige em 1951, trabalhando na África do Sul com dados de concentração de ouro, concluiu que não conseguia encontrar sentido nas variâncias, se não levasse em conta a distância entre as amostras. Isso se tornou possível após Matheron (1963, 1971), baseado nas observações de Krige, desenvolver uma teoria, a qual ele nomeou de Teoria das Variáveis Regionalizadas (VR), que contém os fundamentos da geoestatística.

Matheron (1963) definiu Variável Regionalizada como uma função espacial numérica, que varia de um local para outro, com uma continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples, mas sim por um variograma. Segundo essa teoria, a diferença nos valores de uma dada variável tomada em dois pontos no campo depende da distância entre eles (VIEIRA, 1997). Com isso, a diferença entre os valores do atributo tomados em dois pontos mais próximos no espaço deve ser menor do que a diferença entre valores tomados em dois pontos mais distantes. Logo, cada valor carrega consigo uma forte interferência dos valores de sua vizinhança, ilustrando uma continuidade espacial (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

2.1.2 Hipóteses

A geoestatística utiliza o conceito de funções aleatórias (FA) a fim de construir um modelo para a realidade física, fazendo aparecer estas duas características aparentemente contraditórias: aleatório e estruturado. Assim, o valor de uma variável regionalizada, observado no ponto x (por exemplo, a concentração medida de um elemento traço em uma amostra), $Z(x)$, é interpretado como uma realização particular de uma função aleatória $Z(x)$. $Z(x)$ é aleatória, pois é uma variável aleatória (VA), mas é uma função porque $Z(x)$ e $Z(x+h)$ são dois valores da VR $Z(x)$ nos pontos x e $x+h$ que não são independentes, existindo uma correlação entre eles, que caracteriza a estrutura espacial do fenômeno estudado segundo Hamlett et al. (1986)

Os mesmos autores afirmaram que os dados devem preencher certas condições de estacionaridade para que o variograma possa ser construído e interpretado. De acordo com estes autores, no entanto, estacionaridade é uma condição que freqüentemente não é encontrada, quando fenômenos naturais são estudados. Guimarães (2004) descreve que um processo (ou uma variável) é estacionário se o desenvolvimento desse processo no tempo ou no espaço ocorrer de maneira mais ou menos homogênea, com oscilações aleatórias contínuas em torno de um valor médio, em que nem a amplitude média nem as oscilações mudam de maneira brusca no tempo e no espaço. As características de um processo estacionário independem da origem adotada. Assim, técnicas exploratórias devem ser usadas para se avaliar previamente os dados, com vistas ao atendimento destas hipóteses.

A hipótese de estacionaridade de primeira ordem é definida como sendo a hipótese de que o momento de primeira ordem da distribuição da função aleatória (FA) $Z(x_i)$ é constante em toda a área (GRIPP,1992).

$$E[Z(x_i)] = E[Z(x_i+h)] = m \quad (1)$$

onde:

m = média dos valores amostrais;

h = distância que separa as amostras;

$E[Z(x_i)]$ = esperança matemática da função aleatória $Z(x_i)$;

$E[Z(x_i+h)]$ = esperança matemática da função aleatória $Z(x_i+h)$.

Quando for tomado um vetor h de separação entre dois pontos, o qual apresenta módulo e direção, para qualquer h tem-se:

$$E[Z(x_i) - Z(x_i+h)] = 0 \quad (2)$$

Com essa equação pode-se afirmar que o primeiro momento da variável aleatória é igual a zero.

Segundo Vieira et. al. (1983) a estacionaridade de segunda ordem é definida quando além de atender a condição de primeira ordem, a função aleatória apresenta a característica de, para cada par de valores $[Z(x_i)-Z(x_i+h)]$, a covariância existir e depender apenas da distância h que pode ser definida por:

$$Cov(x_i, x_i+h) = E[Z(x_i)-Z(x_i+h)] \cdot m(x_i) \cdot m(x_i+h) \quad (3)$$

O segundo momento da variável aleatória corresponde à diferença entre dois pontos, sendo dado por duas vezes à variância menos duas vezes a covariância dos valores, em que sua metade é um valor denominado função de variância, definido como:

$$2\gamma(x_i, x_i+h) = E[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2 \quad (4)$$

Se a hipótese de estacionaridade de segunda ordem puder ser satisfeita, a covariância $C(h)$ e o variograma $2\gamma(h)$ são ferramentas equivalentes para caracterizar a dependência espacial.

Existe uma terceira hipótese, menos restritiva, é a hipótese intrínseca, normalmente utilizada quando a hipótese da segunda ordem não é aceita satisfatoriamente. Hipótese que considera apenas que a média dos valores $Z(x)$ e a variância dos incrementos $Z(x_i)-(x_i+h)$ ocorrem independentemente da localização na região, sendo função apenas do valor de h . Tal hipótese requer apenas a hipótese de existência do variograma, sem a existência da variância finita. Portanto, a variância de $Z(x)$ não é finita, mas a variância do primeiro incremento de Z , $Z(x_i)-(x_i+h)$, é finita, e este incremento é fracamente estacionário (VIEIRA et al., 1983).

2.1.3 Variograma

O variograma é o gráfico que expressa a variação do atributo com a distância entre pontos no campo de amostragem. A variância total de um determinado atributo é desmembrada em diferentes distâncias amostradas e, com isso, objetiva-se encontrar a estrutura da variância. Se a variância aumenta com o aumento da distância, isso quer dizer que

a variância e a distância co-variam, indicando que são variáveis dependentes. Se for dependente não se pode aplicar os parâmetros oriundos da estatística clássica (SILVA, 1988).

Ele é definido a partir da semivariância das medidas feitas em amostras espaçadas no campo de determinada distância h , ou seja, “lag” (WEBSTER, 1985), sendo a soma dos quadrados da diferença entre valores amostrados, separados por uma distância (h), divididos por duas vezes o número de pares possíveis e é estimado pela seguinte equação

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (5)$$

em que: $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ separados por um vetor h ; e $Z(x_i)$ é a variável aleatória em estudo na i -ésima posição.

O gráfico da semivariância *versus* a distância h (Figura 1) representa o (semi)variograma, que permite obter a estimativa do valor de semivariância para as diferentes combinações de pares de pontos e assim analisar o grau de dependência espacial da variável estudada e definir os parâmetros necessários para a estimativa de suas características em locais não amostrados (SOUZA et al., 1997).

Segundo Vieira (1997), em um (semi)variograma são estimados os parâmetros efeito pepita (*nugget effect*), patamar (*sill*) e alcance (*range*), representados respectivamente pelos símbolos C_0 , $C_0 + C$ e A , como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Representação gráfica de um (semi)variograma típico e seus componentes

Espera-se que: as diferenças $[Z(x_i) - Z(x_i+h)]$ decresçam assim que a distância (h) que os separa, decresça; as medições localizadas próximas sejam mais parecidas entre si do que aquelas separadas por grandes distâncias; e que $\gamma(h)$ aumente com a distância h . Por definição, $\gamma(0) = 0$, como pode ser visto pela equação 1, quando $h=0$. Entretanto, na prática, à medida que h tende para 0 (zero), $\gamma(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado efeito pepita (C_0), quando h aumenta, freqüentemente aumenta até uma distância A , chamada de alcance (A) da dependência espacial, a partir da qual a semivariância neste ponto é chamada de patamar (C_0+C_1), cujo valor é aproximadamente igual à variância dos dados, se ela existe, e é obtida pela soma do efeito pepita e a variância estrutural (C) (VIEIRA, 2000) .

O valor de C_0 revela a descontinuidade do variograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte dessa descontinuidade pode ser também devido a erros de medição, mas é impossível quantificar qual contribui mais, se os erros de medição ou variabilidade a uma escala menor do que aquela amostrada (VIEIRA, 2000). Souza (1992) afirmou que amostras separadas por distâncias menores que o alcance (a) são espacialmente dependentes, e que o mesmo é também utilizado para definir o raio de ação (“alcance”) máximo de interpolação por krigagem, onde os pesos utilizados na ponderação podem afetar os valores estimados. Segundo Silva (1988), o raio de ação é um dos parâmetros principais no estudo da variabilidade espacial, pois é a distância limite na escolha do tipo de estatística a ser aplicada, ou seja, geoestatística ou a estatística clássica. Por outro lado, amostras separadas por distâncias menores que o alcance (a) são correlacionadas umas às outras, o que permite que se faça interpolações para espaçamentos menores do que os amostrados.

O patamar é atingido quando a variância dos dados torna-se constante com a distância entre as amostras. O patamar é um parâmetro importante, pois permite a determinação da distância limite (alcance) entre dependência e independência entre amostras. Dependendo do comportamento do variograma para grandes valores de h , o modelo pode ser classificado em duas categorias: modelos com patamar e modelos sem patamar (SILVA, 1988).

Segundo Vieira et al. (1983), são encontrados, basicamente, quatro modelos de variogramas empíricos com patamar:

a) modelo linear

$$\gamma(h) = C_0 + \left(\frac{C}{a}\right) * h \quad 0 < h < a \quad (6)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad h > a \quad (7)$$

em que: C/a é o coeficiente angular para $0 < h < a$. Nesse modelo, o patamar é determinado por inspeção; o coeficiente angular C/a é determinado pela inclinação da reta que passa pelos primeiros pontos de $\gamma(h)$, dando-se maior peso àqueles que correspondem a 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 $C = \text{patamar} - C_0$.

b) modelo esférico

$$\gamma(h) = C_0 + C * \left[\frac{3}{2} * \left(\frac{h}{a}\right) - \frac{1}{2} * \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right] \quad 0 < h < a \quad (8)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad h > a \quad (9)$$

O modelo esférico é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita (C_0) e do patamar ($C_0 + C$), depois passando uma reta que intercepte o eixo γ 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 $a=3a'/2$. O modelo esférico é aproximadamente linear até cerca de $1/3 a$.

c) modelo exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C * \left[1 - \exp\left(-3 * \frac{h}{a}\right) \right] \quad 0 < h < d \quad (10)$$

em que: d é a máxima distância na qual o variograma é definido. 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 como a distância após a qual o variograma se estabiliza. Os parâmetros C_0 e C para os modelos exponencial e gaussiano são determinados da mesma maneira que para o esférico.

d) modelo gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C * \left[1 - \exp \left(-3 * \left(\frac{h}{d} \right)^2 \right) \right] \quad 0 < h < d \quad (11)$$

Pesquisadores como Trangmar et al. (1987), Souza (1992), Cambardella et al. (1994), Salviano (1996) e Paz et al. (1997) encontraram o modelo matemático esférico como o mais adaptado para descrever o comportamento de variogramas de atributos de plantas e de solos.

Os modelos sem patamar correspondem a fenômenos que têm uma capacidade infinita de dispersão, e por isto, não têm variância finita e a covariância não pode ser definida (VIEIRA, 2000).

Jakob (1999) afirmou que a função semivariância assume um papel importante na interpolação de valores através da técnica de Krigagem ordinária, que leva a erros mínimos na interpolação.

2.1.4 Krigagem

A krigagem é o método de interpolação em geoestatística, sendo utilizada para obtenção de mapas espaciais de parâmetros de solo e plantas. Na maioria das vezes, o interesse da análise geoestatística não se limita à obtenção de um modelo de dependência espacial, desejando também prever valores em pontos não amostrados. O interesse pode ser em um ou mais pontos específicos da área ou obter uma malha de pontos interpolados que permitam visualizar o comportamento da variável na região através de um mapa de isolinhas ou de superfície (SILVA JUNIOR, 2001).

Conhecido o (semi)variograma da variável, e havendo dependência espacial entre as amostras, podem-se interpolar valores em qualquer posição no campo de estudo, sem tendência e com variância mínima (VIEIRA, 2000). Para se obter esse maior detalhamento da área em estudo é necessária a aplicação da krigagem (SILVA JUNIOR, 2001).

O nome Krigagem foi dado por Matheron (1963) em homenagem ao engenheiro de minas sul-africano Krige (VIEIRA, 2000). Segundo Salviano (1996), a krigagem é uma técnica usada na geoestatística com o objetivo de estimar valores de variáveis para locais onde

as mesmas não foram medidas a partir de valores adjacentes interdependentes. O valor estimado da variável é dado pela equação:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (12)$$

em que: $Z(x_0)$ é o valor estimado para local x_0 não amostrado; $Z(x_i)$ é o valor obtido por amostragem no campo; e λ_i é o peso associado ao valor medido na posição x_i .

De acordo com Ribeiro Junior (1995) e Camargo (1997), o processo de krigagem se diferencia dos outros métodos de interpolação pela forma de atribuição dos pesos, que são variáveis de acordo com a variabilidade espacial expressa pelo variograma, representado na figura 2.

Figura 2 - Representação visual do princípio de estimativa dos interpoladores para inferir valores, de uma variável distribuída no espaço, em locais não amostrados

Fonte: Adaptado do INPE - Divisão de Processamento de Imagens (2000).

Esse estimador nada mais é que uma média móvel ponderada. O que torna a krigagem um ótimo interpolador, então, é a maneira como os pesos são distribuídos (VIEIRA, 2000). Pontos próximos da posição a ser interpolada levam maiores pesos que os mais distantes, e ainda, as distâncias consideradas não são somente entre o ponto a ser predito e os vizinhos, mas também entre os vizinhos (SILVA JUNIOR, 2001). Com isso pode-se enfatizar que, para uma mesma distância, dados agrupados, terão menores pesos, quando comparados individualmente com pontos isolados, pois estes dados trazem informações quase redundantes de uma mesma região.

Segundo Vieira (1997), para que o estimador seja ótimo, o mesmo não pode ser tendencioso (Equação 13) e deve ter variância mínima (Equação 14). Essas duas condições devem ser rigorosamente satisfeitas e, para tanto, são usadas como ponto de partida para a dedução das equações. A condição de não tendência significa que, em média, a diferença

entre valores estimados e medidos para o mesmo ponto deve ser nula. A condição de variância mínima significa que, embora possam existir diferenças ponto por ponto entre o valor estimado e o medido, essas diferenças devem ser mínimas (VIEIRA, 2000).

$$E\{Z^*(x_0) - Z(x_0)\} = 0 \quad (13)$$

$$Var\{Z^*(x_0) - Z(x_0)\} = \{[Z^*(x_0) - Z(x_0)]\}^2 = \text{mínimo} \quad (14)$$

2.1.5 Cokrigagem

A cokrigagem é um procedimento geoestatístico segundo o qual diversas variáveis regionalizadas podem ser estimadas em conjunto, com base na correlação espacial entre si. É uma extensão multivariada do método da krigagem quando para cada local amostrado obtém-se um vetor de valores em lugar de um único valor.

A aplicação da cokrigagem torna-se bastante evidente quando duas ou mais variáveis são amostradas nos mesmos locais dentro de um mesmo domínio espacial e apresentam significativo grau de correlação. Valores ausentes não se tornam problemáticos, pois o método deve ser usado exatamente quando uma das variáveis apresenta-se sub-amostrada em relação às demais. Essa variável é conhecida como “primária” e as demais como “secundárias”. O objetivo é, portanto, melhorar a estimativa da variável sub-amostrada utilizando aquelas mais densamente amostradas.

2.1.5.1 Variograma cruzado

Para alguns tipos de análises em que envolve mais de uma variável, onde a determinação de uma segunda variável é mais onerosa e ou de difícil amostragem, comprometendo o estudo da variabilidade espacial de determinada variável, aplica-se o método da cokrigagem que se baseia nos parâmetros expressos por um variograma cruzado entre duas variáveis para a estimativa de novos valores em locais não amostrados.

Variogramas cruzados têm por objetivo descrever a variabilidade espacial e ou temporal simultaneamente entre duas variáveis aleatórias, sendo que, uma dessas variáveis deve ser de simples determinação (covariável), isto é, fácil amostragem e ou baixo custo e apresentar uma boa correlação espacial com a variável de difícil determinação (variável primária) que se deseja estimar valores. Desta forma, estará trabalhando com a idéia de covariável.

Considerar duas variáveis $\{Z_1(t_{1i}), i=1, \dots, n_1\}$ e $\{Z_2(t_{2j}), j=1, \dots, n_2\}$, com as amostragens feitas no mesmo domínio espacial (área ou tempo), mas que o número de amostras de Z_1 seja

superior ao número de amostras de Z_2 ($n_1 > n_2$). Assumindo que pelo menos a hipótese intrínseca está sendo atendida para cada variável individualmente e para a distribuição conjunta das variáveis, pode-se definir os variogramas individuais e os variogramas cruzados como:

$$Cov_{12}(h) = E \{Z_1(x+h) Z_2(x)\} - m_1 m_2 \quad (15)$$

e

$$Cov_{21}(h) = E \{Z_2(x+h) Z_1(x)\} - m_2 m_1 \quad (16)$$

Consequentemente, o variograma cruzado entre estas variáveis será:

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2N(h)} \left\{ \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_1(x+h) - Z_1(x)] [Z_2(x+h) - Z_2(x)] \right\} \quad (17)$$

Algumas exigências devem ser cumpridas para o cálculo do variograma cruzado:

- As informações existentes devem ser provenientes da mesma posição geográfica para ambas variáveis, ou seja, Z_1 e Z_2 devem ter a mesma posição geográfica. (ou pelo menos a maioria dos pontos)
- As variáveis em estudo Z_1 e Z_2 devem ser correlacionadas. A covariável utilizada deve apresentar uma boa correlação espacial com a variável primária a ser estimada;
- As variáveis Z_1 e Z_2 devem apresentar dependência espacial individualmente. Tanto a variável primária a ser estimada, quanto a covariável utilizada, devem apresentar um variograma experimental ajustado a um modelo teórico, e parâmetros bem definidos;
- Para que a cokrigagem seja aplicada, as variáveis Z_1 e Z_2 devem apresentar dependência espacial em conjunto, dependência esta expressa pelo variograma cruzado.

A cokrigagem é uma extensão multivariada do método da krigagem quando para cada local amostrado obtém-se um vetor de valores para o local de um único valor (LANDIM, et al. 2002).

A estimativa de uma variável Z^* para qualquer local x_0 deve ser uma combinação linear de Z_1 e Z_2 , ou seja:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_i Z_1(x_i) + \sum_{i=1}^{N_2} \lambda_i Z_2(x_i) \quad (18)$$

Em que N_1 e N_2 são os números de vizinhos medidos de Z_1 e Z_2 , respectivamente, e λ_1 e λ_2 são os ponderadores associados a Z_1 e Z_2 os quais são distribuídos de acordo com a dependência espacial de cada uma das variáveis entre si e com a correlação cruzada entre elas. Da mesma forma que a krigagem, para que este estimador seja ótimo, o mesmo também deve ter variância mínima e não ter tendência.

Embora haja outros métodos de interpolação de dados conhecidos, a krigagem e a cokrigagem são os mais utilizados para a análise de mapas de contorno ou de superfície para distribuição espacial dos atributos físico-hídricos do solo, mapas estes, que viabilizam na tomada de decisões importantes, por exemplo, onde e como aplicar uma lâmina de água baseado nas informações dos atributos do solo conhecidos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área Experimental

3.1.1 Localização

A área experimental da Fazenda Areão do Campus "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo (ESALQ-USP), no município de Piracicaba, Estado de São Paulo, localizada nas coordenadas geográficas, latitude de 22°42'S, longitude de 47°37'W e altitude média de 546 metros. (Figura 3)

Figura 3 - Área efetiva do estudo da Fazenda Areão, área experimental da ESALQ-USP/Piracicaba-SP

3.1.2 Caracterização Climática

O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen (1931), denominado tropical de altitude, mesotérmico, de inverno seco, em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente ultrapassa 22°C. As médias anuais de temperatura, precipitação pluviométrica e umidade relativa são de 21°C, 1.257mm e 74%, respectivamente. A estação seca ocorre entre os meses de abril e setembro, sendo julho o mês mais seco. O mês mais chuvoso oscila entre janeiro e fevereiro. O total das chuvas do mês mais seco não ultrapassa 30 mm (VILLA NOVA, 1989).

3.1.3 Modelo Numérico de Elevação (MNE)

Para a geração do Modelo numérico de elevação (MDE), foram obtidos os valores das curvas de nível de intervalo de 5m do levantamento topográfico da área da Fazenda Areão através do banco de dados do Relatório de apresentação do diagnóstico para a elaboração do Plano Diretor Socioambiental participativo do campus “Luiz de Queiroz”, Piracicaba/SP (2006). De posse dos valores das curvas de nível, foram processados pelo método do algoritmo da triangulação de Delaunay citado por Moura (2006) num software de plataforma SIG, a partir desse processo, foi gerado o MNE, e através deste, foram extraídos os planos de informação: mapa de declividade e de fluxo acumulado (acúmulo do fluxo de água) e os dados de altitude.

O Modelo numérico (Figura 4) seguiu o padrão do mapa de levantamento topográfico apresentado no Relatório já mencionado, o qual, o levantamento foi realizado no Sistema de coordenadas UTM, com o Datum de referência SAD 69 numa escala de 1:10.000.

Figura 4 – Modelo numérico de elevação da área da fazenda Areão, área experimental da ESALQ/USP, Piracicaba-SP.

3.1.3.1 Plano de informação de Declividade (Relevo)

A Figura 5 apresenta o plano de informação de declividade foi a partir dos dados de altitude gerados do MDE.

Figura 5 – Plano de informação de declividade (Clinográfico) da área.

3.1.3.2 Plano de direção do fluxo e fluxo acumulado (Rede natural hidrológica)

O Plano de direção de fluxo foi definido pelas relações entre pontos diferentes dentro de uma continuidade topológica. A direção de fluxo é necessária para que uma drenagem funcional possa existir. Obteve-se a direção de fluxo de água pela função “*flow direction*” do SIG, gerando uma grade regular que definiu as direções de fluxo, tomando-se por base a linha de maior declividade do terreno. A nova grade numérica gerada determinou a direção de

maior declividade de um pixel em relação aos seus oito pixels vizinhos; desta forma, ocorreu a descrição numérica da direção que a água percorreu após atingir cada pixel.

A partir da grade regular gerada de direção de fluxo, o fluxo acumulado foi obtido pela função “*flow accumulation*”. De acordo com Mendes & Cirilo (2001) o fluxo acumulado representa a rede hidrográfica, sendo possível montar uma nova grade contendo os valores de acúmulo de água em cada pixel. Deste modo, cada pixel recebe um valor correspondente ao número de pixels que contribuem para que a água chegue até ele. A partir da direção de fluxo, o fluxo acumulado é obtido somando-se a área das células (quantidade de células) na direção do fluxo (ou escoamento). Caso todas as células circunvizinhas apresentem vetores direcionados para uma mesma célula, um valor elevado de fluxo acumulado será obtido para esta mesma célula. Nas Figuras 6 e 7 apresentam os planos de informação da direção de fluxo e fluxo acumulado, respectivamente da área.

Figura 6 – Plano de informação direção de fluxo da área.

Figura 7 – Plano de informação: fluxo acumulado de água superficial

3.1.4 Solo

Na Figura 8, mapa de solos da Fazenda Areão foram identificadas 10 unidades de mapeamento, agrupando os diferentes tipos de solos. As unidades de mapeamento foram classificadas baseadas no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999) e o Manual de descrição e coleta de solos no campo (LE MOS e SANTOS, 1996). Informações geradas no Relatório de apresentação do diagnóstico para a elaboração do Plano Diretor Socioambiental participativo do campus “Luiz de Queiroz”, Piracicaba/SP (2006).

Figura 8 – Representação esquemática dos solos classificados da fazenda Areão segundo o Relatório de apresentação do diagnóstico para a elaboração do plano diretor socioambiental participativo do campus “Luiz de Queiroz”, Piracicaba/SP(2006)

Os principais grupos de solos foram classificados segundo O Sistema Brasileiro de classificação de Solos, EMBRAPA (1999) na Fazenda; como:

- I. Alissolos: apresentam restrições quanto à fertilidade, que pode estar acrescida de limitações devido a outros fatores. Os álicos e com argila de atividade alta requerem quantidades de corretivos relativamente grandes para eliminar a toxidade pelo alumínio e suprir as plantas em cálcio e magnésio. De maneira geral essa classe ocorre em relevo ondulado ou mais acidentado, apresentando como restrição também as condições de relevo.

- II. Argissolos: compreendem solos com B textural, normalmente com transição abrupta ou clara entre o horizonte A ou E e o Bt e presença de cerosidade. Esses solos apresentam serias limitações devidas à maior susceptibilidade à erosão no caso dos solos com caráter abrupto, as quais são tanto mais serias quanto maior a declividade do terreno. Pedregosidade e textura cascalhenta tem geralmente ocorrência em condições de relevo acidentado, onde os solos são mais susceptíveis á erosão. Eventualmente podem ocorrer associados á presença de matações os quais interferem na sua utilização: transito de máquinas, cultivo, etc.
- III. Cambissolos: apresentam uma diversidade grande, tornando-se difícil o exame coletivo e apreciações generalizadas quanto às qualidades e comportamento para o conjunto desses solos sem especificar os tipos de Cambissolos, e sem ter em conta a disparidade de condições de relevo e clima em que são encontrados.
- IV. Gleissolos: apresentam limitações relacionadas com drenagem deficiente e, nos distróficos e álicos, também com a baixa fertilidade. Outras limitações que podem ser mencionadas são: permeabilidade lenta, restrição ao enraizamento, agravam-se a limitação concernente à erodibilidade, elevado risco de inundações ou alagamentos freqüentes (devido à presença de lençol freático elevado).
- V. Neossolos Litólicos: por serem muito rasos, apresentam limitações muito serias em vistas da pequena espessura, dificultando a penetração de raízes. Em áreas acidentadas, pode ocorre o efeito das enxurradas, podendo vir a ocorrer problemas sérios de erosão.
- VI. Nitossolos: são de grande importância agrônômica: os eutróficos são de elevado potencial nutricional e os distróficos, e mesmo os álicos, respondem bem a aplicação de fertilizantes e corretivos. Para esses dois últimos, a fertilidade constitui o fator limitante associado ao risco a erosão com a acentuação do declive do terreno. Em vista das suas qualidades, tais solos, abstraindo-se o relevo, são aptos a todos os usos agropastoril-florestais adaptados às condições climáticas.

ao classe Alissolo foi extinta segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, (EMBRAPA, 2009). Sua extinção foi em função do processo de formação (que implica na

concentração de alumínio no solo), não ser considerado como principal, tendo em vista que o referido processo ocorre em diversas classes de solos, independente do principal processo de formação. Em face do exposto, a concentração de alumínio no solo foi considerada como processo secundário, e, por isso, não é pertinente no nível de ordem. Além disso, no 1º nível (ordem), as classes são identificadas essencialmente por morfologia, o que não acontecia nos Alissolos. Os solos contidos nesta classe foram redistribuídos nas ordens dos Argissolos e Nitossolos.

3.2 Amostragem

O delineamento experimental da amostragem das coletas foi em malha amostral agregada ou agrupada, ou seja, uma grade composta com intervalos regulares de 100m que cobriu a maior parte da área e três sub-áreas com uma grade de intervalo regular de 50m distribuída de maneira aleatória (Figura 9), constituindo uma amostragem agregada, tipo de arranjo definido por Landim et al. (2002).

Para a coleta do solo na área, os pontos foram georreferenciados, através de um software dedicado, gerando arquivos de interface com o palmtop (“display” para visualização dos dados) e a antena receptora GPS de sinal L₁ com correção diferencial, indicando ponto a ponto a ser coletado.

Figura 9 – Distribuição das amostras na Fazenda Areão

Em cada ponto de amostragem, com o auxílio de um trado para amostra deformada foram retiradas amostras de 0 a 30 cm (superficial), representando a secção de maior atividade

de intemperização do solo, como também a mais influenciada pelo manejo agrícola. Para esse levantamento foram coletadas 146 amostras de 0 a 30cm.

3.3 Determinação dos atributos físicos do solo

3.3.1 Frações granulométricas

As análises físicas foram realizadas no Laboratório de Física do solo, do Departamento de Engenharia de Biossistemas, para as análises das frações granulométricas adotando a metodologia de Bouyoucos (densímetro), conforme as recomendações da Embrapa (1997). Nesse método, utilizou-se o dispersante hidróxido de sódio (NaOH) a 0,1N, ou seja, 40g l⁻¹ e a agitação mecânica das amostras em mesa agitadora por 16 horas. Em seguida foram colocadas as amostras em provetas graduadas e foram completadas com água, a análise granulométrica nesse método baseou na velocidade de sedimentação das partículas sólidas do solo, em que são realizadas duas leituras, a primeira aos quarenta segundos pós-agitação de um minuto, informa sobre o conteúdo de argila + silte, a segunda, às duas horas, sobre o conteúdo de silte e, por diferença, obtém-se o conteúdo de areia. Os valores de argila, silte e areia, para as profundidades de interesse, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores representativos da análise granulométrica de algumas amostras de solos respectivas as classes de solo amostradas na área experimental nas camadas superficiais (0-0,30m)

Granulometria dos tipos de solos da Área experimental									
Solo 1*					Solo 5*				
Amostra	Profundidade	% argila	% silte	% areia	Amostra	Profundidade	% argila	% silte	% areia
48	0-30	48.54	15.67	35.79	153	0-30	53.70	14.85	31.45
49	0-30	46	16	39	154	0-30	57.90	16.71	25.39
143	0-30	56	16	29	164	0-30	41.11	22.9	35.99
Solo 2*					Solo 6*				
133	0-30	19.88	42.80	37.32	332	0-30	34.89	35.55	29.56
134	0-30	1.90	64.90	33.20	365	0-30	55.45	24.36	20.19
135	0-30	28.25	26.32	45.43	396	0-30	52.53	17.40	30.07
Solo 3*					Solo 7*				
94	0-30	35	23.1	41.9	34	0-30	60.13	14.51	25.37
106	0-30	41.53	24.33	34.14	35	0-30	40.10	16.01	43.88
138	0-30	32.9	22.42	44.68	301	0-30	49.14	18.53	32.34
Solo 4*					Solo 8*				
102	0-30	35.44	15.4	49.15	44	0-30	28.79	37.71	33.50
103	0-30	35.52	15.44	49.03	45	0-30	43.18	22.38	34.43
129	0-30	51.74	13.24	35.02	54	0-30	43.38	18.43	38.19

Nota: Solo 1* - Complexo Nitossolo Vermelho E. e Nitossolo Vermelho E.; Solo 2* - Cambissolo Háplico Tb D. e Argissolo V.A.; Solo 3* - Argissolo Vermelho-Amarelo E.; Solo 4* - Nitossolo Vermelho Distrófico; Solo 5* - Argissolo Vermelho Distrófico; Solo 6* - Complexo Alissolo Hip. E Cambissolo Háplico Al.; Solo 7* - Cambissolo Háplico Tb D. e Solo 8* - Alissolo Crômico. (Classificação segundo a EMBRAPA, 1999).

3.3.2 Densidade do solo

Para a determinação da densidade do solo, foram retiradas quatro amostras de cada classe de solo da área ao lado dos pontos amostrados para a análise das frações granulométricas, totalizando 28 amostras indeformadas. O processo de coleta se deu através da abertura de trincheira, onde as amostras indeformadas foram coletadas com um anel de volume conhecido no centro do horizonte da camada superficial de 0 a 0,30m

Após a coleta no campo das amostras indeformadas, os anéis foram acondicionados em papel alumínio para a manutenção da umidade dos mesmos e conservação da própria estrutura da amostra e levados para o laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia de Biossistemas. As amostras foram analisadas de acordo com metodologia proposta por Camargo et al. (1986).

3.4 Estimativa das umidades na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente para a utilização das equações de pedotransferência

Após determinar todos os atributos físicos em toda a Fazenda Areão, foi realizada uma avaliação da distribuição espacial da CAD correlacionada com a fração argila+silte ao nível de pivô, área localizada na Fazenda que pertence ao Departamento de Engenharia de Biossistemas. Os dados georreferenciados numa grade amostral de 50x50m da CAD (22 pontos amostrais) e das frações argila+silte (42 pontos amostrais) da área do pivô, totalizando 64 pontos, foram fornecidos pelo Professor Rubens Duarte Coelho do Departamento de Engenharia de Biossistemas.

De posse do banco de dados, foi avaliada a correlação da grade amostral mais densa, 50x50m com uma grade menos densa de 100x100m de 12 pontos amostrais, com informações de distribuição espacial da fração argila+silte, dos quais, 4 pontos desses dados foram transformados, através das equações de pedo-transferência (ARRUDA et.al., 1987) para se estimar a CAD.

Normalmente para se estimar a CAD de um solo, determina-se as variáveis de umidade desse solo, variáveis estas, obtidas através das curvas de retenção de água no solo, método mais convencional. Tal metodologia demanda equipamentos como o extrator de umidade de solo, segundo o método descrito por Richards e Fireman (1943), aparelho este, de elevado custo, além de que, o processo na obtenção das curvas de retenção leva tempo. Uma alternativa para o caso onde o custo dessa caracterização do solo é inviável poderá fazer o uso de modelos que viabilizam a obtenção dos parâmetros hídricos a partir de outras

características do solo de mais fácil obtenção. Metodologia esta de grande utilidade no gerenciamento de áreas de demanda hídrica diferenciada. O uso de modelos para a determinação dos parâmetros de retenção de água no solo a partir de características físicas como textura e densidade global foram estudados por diversos autores (ARRUDA et al., 1987; COELHO et al., 1998).

Os modelos de equação de ajuste de pedotransferência utilizados no trabalho para a determinação das umidades do solo (% em peso) na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP) foram:

$$y = 3,07439 + 0,629239x - 0,00343813x^2 \quad (13)$$

$$y = \frac{398,889x}{(1308,09 + x)} \quad (14)$$

As equações 13 e 14 são a relação entre umidade do solo na capacidade de campo (CC % peso) e o teor de argila+silte (x%) e a umidade no ponto de murcha permanente (PMP % peso) e o teor de argila+silte (x%), respectivamente. Foi o modelo quadrático para CC e o hiperbólico para PMP dos 17 modelos de equação que mais se ajustaram a textura do solo para as condições do Estado de São Paulo (ARRUDA et al., 1987). Esses modelos, segundo os autores, tiveram um coeficiente de correlação das frações argila+silte de 0,9085 para a umidade na capacidade de campo e 0,9610 no ponto de murcha permanente, os quais foram validados com as curvas de retenção de água no solo, pelo método descrito por Richards e Fireman (1943).

Portanto para estimar as características hídricas do solo foram somadas as frações argila + silte, resultado da análise das frações granulométricas, obtendo assim, o x (argila+silte %) substituindo nas equações 13 e 14 do modelo quadrático para a umidade na capacidade de campo e no hiperbólico para a umidade no ponto de murcha permanente, respectivamente. De posse dos valores percentuais de argila+silte e da densidade global em percentagem das umidades CC e PMP, estimou-se a CAD (capacidade de água disponível) para a área de interesse em milímetros (mm), pela seguinte equação:

$$CAD = \frac{(Y(CC\%) * dg) - (Y(PMP\%) * dg) * p}{100} \quad (15)$$

Onde: $Y(CC\%)$ - umidade do solo na capacidade de campo;

$Y(PMP\%)$ - umidade no solo no ponto de murcha permanente;

dg – densidade do solo e

p – profundidade do horizonte.

Através dos dados de CAD estimada, foi correlacionada com dados de CAD real da área do pivô da Fazenda, obtidos pelas curvas de retenção, realizadas no laboratório de Física do solo do Departamento de Engenharia de Biosistemas.

3.5 Análise Exploratória dos dados

O conjunto de dados do teor das frações granulométricas: argila, silte, areia, argila+silte, altitude e inclinação máxima foram submetidas à análise estatística descritiva, determinando os valores mínimos e máximos, média, mediana, desvio-padrão, coeficiente de variação e os coeficientes de assimetria e curtose. Comumente as hipóteses de normalidade e independência dos dados não são testadas, porém, a independência tem que ser assumida *a priori*, antes de se amostrar espacialmente.

3.6 Análise do Grau de dependência espacial

Foi realizada a análise geoestatística para verificar a dependência espacial das variáveis. Para os variogramas simples, através da krigagem, para todas as frações granulométricas.

Para os variogramas cruzados da fração areia versus altitude e a areia versus inclinação máxima, pela cokrigagem, foram estimados os valores, Z_1 (variável primária), para cada local não amostrado x_0 em relação a Z_2 para cada local amostrado x_1 , o valor estimado foi uma combinação linear de Z_1 e Z_2 , distribuídos de acordo com a dependência espacial de cada uma das variáveis entre si e a correlação cruzada.

A eficiência do ajuste dos modelos pôde ser observada pelo coeficiente de correlação (r) entre os dados observados e estimados, através da equação de regressão linear, ou seja, pela validação cruzada (ROBERTSON, 1998).

Os parâmetros do variograma, efeito pepita (C_0); patamar ($C_0 + C$) e alcance (A) foram obtidos através do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\hat{\gamma}(h)$. A escolha do modelo baseou-se na menor valor da soma dos quadrados dos resíduos (SQR), no maior coeficiente de determinação múltipla (R^2) e na validação cruzada para o ajuste dos modelos teóricos aos variogramas experimentais.

A validação cruzada foi utilizada para avaliar se os modelos dos variogramas simples serviram de base ou não para a realização da krigagem. A validação cruzada, na co-krigagem, além de servir de base de melhor ajuste, como serve para a krigagem, também serviu de parâmetro na comparação de variogramas cruzados estimados para várias grades amostrais, através do coeficiente de determinação múltipla ou regressão (R).

Simulação que foi realizada através dos (semi)variogramas cruzados para a espacialização da correlação da areia versus dados de altitude e areia versus dados de inclinação máxima em 2 arranjos de amostragens de 20x20m e 40x40m.

Trangmar et al. (1987) sugeriram o uso da % da variância do efeito pepita para mensurar a dependência espacial, sendo que Cambardella et al. (1994) propuseram os seguintes intervalos para avaliar a % da variância do efeito pepita: $\leq 25\%$ - forte dependência espacial; entre 25 e 75% - moderada dependência espacial e $\geq 75\%$ - fraca dependência espacial, denominado de IDE (Índice de dependência espacial):

$$IDE = \frac{c_0}{c_0+c} \times 100 \quad (16)$$

Para as análises dos variogramas gerados no presente trabalho foi utilizado o IDE proposto por Zimback (2001):

$$IDE = \frac{c}{c_0+c} \times 100 \quad (17)$$

Assim sendo, foi adotada os critérios de classificação quanto ao grau de dependência espacial das variáveis estudadas segundo Zimback (2001):

I - Variável independente espacialmente – relação entre a componente estrutural e patamar for igual a 0% neste caso temos o variograma de efeito pepita puro.

$$IDE = \frac{c}{c_0+c} = 0 \quad (18)$$

II - Variável com fraca dependência espacial – relação entre a componente estrutural e patamar for menor ou igual a 25%.

$$IDE = \frac{c}{c_0+c} \leq 0,25 \quad (19)$$

III - Variável com moderada dependência espacial – relação entre a componente estrutural e patamar estiver entre 25 e 75%.

$$IDE = 0,25 < \frac{c}{c_0+c} < 0,75 \quad (20)$$

IV - Variável com forte dependência espacial – relação entre a componente estrutural e patamar estiver entre 75 e 100%.

$$IDE = 0,75 \leq \frac{c}{c_0+c} \leq 1,00 \quad (21)$$

A análise da dependência espacial foi realizada utilizando ferramentas geoestatísticas, com auxílio do software GS⁺ (ROBERTSON, 1998), utilizado para obtenção dos (semi)variogramas e dos (semi)variogramas cruzados dos atributos estudados e estatística descritiva e exploratória dos dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de teores correspondentes às frações granulométricas obtidos das 146 amostras (profundidade de 0-0,3m), foram analisados por meio da estatística descritiva, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Estatística descritiva e teste de normalidade das variáveis argila, silte, areia e argila+silte para a camada de 0 a 0,30m

Estatística	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Argila+silte (%)	inclinação Máxima (%)	Altitude (m)
Número de amostras	146	146	146	146		
Média	39.48	22.23	38.28	61.66	8.77	532.83
Mediana	40.75	19.41	37.57	62.32	8.0	533
Mínimo	1.9	0.00	20.19	40.63	1.0	494
Máximo	64.54	64.90	59.37	79.81	35.0	566
Quartil inferior	34.89	15.50	33.19	55.74	5.0	522
Quartil superior	47.58	24.12	44.11	66.81	11.0	544
Variância	146.06	133.48	54.36	54.36	27.02	231.07
Desvio-padrão	12.09	11.55	7.37	7.37	5.2	15.2
Assimetria	-0,76	1.81	0,20	-0.19	1.25	-0.07
Curtose	1.10	3.39	-0.18	-0.21	1.94	-0,5
CV	30.62	51.96	19.25	11.96	59.65	2.85
W	0.95	0.81	0.99	0.99	0.90	0.99
valor p	0.0001*	0.00*	0.49 ^{ns}	0.49 ^{ns}	0.00*	0.00*

W -Teste de Shapiro- Wilk; * Significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade

Analisado os valores dos teores das frações granulométricas nos 146 pontos amostrais da área observou que a fração argila compõe uma distribuição cuja média é 1% menor que a mediana, revelando uma distribuição ligeiramente assimétrica, como pode ser observado pelo coeficiente de assimetria com valor negativo. Na fração areia houve um comportamento semelhante em relação entre a média e a mediana, diferentemente do silte.

As frações argila, silte e a inclinação máxima e a altitude não apresentaram normalidade em sua distribuição, de acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade, ao contrário da areia e argila+silte, mesmo assim, os mesmos apresentaram um patamar também definido, ou seja, não comprometendo a técnica de interpolação.

Segundo Cavalcante et al. (2007), a normalidade dos dados não se configura como uma exigência da geoestatística, o mais importante é a ocorrência ou não do efeito proporcional, ou seja, se a média e a variabilidade dos dados são constantes na área de estudo. A

importância da verificação de distribuição normal ou não normal dos dados permite averiguar se existem valores extremos (*outlier* máximo e *outlier* mínimo) que destoam do conjunto de dados, possibilitando dessa maneira a exclusão de valores discrepantes que podem ser decorrentes de erros de amostragem ou de erros analíticos (SIQUEIRA et. al., 2009).

Warrick e Nielsen (1980) citado por Gonçalves et. al. (2001) descreveram que em se tratando de dados obtidos na natureza, o ajuste a uma distribuição teórica é apenas aproximado, e de acordo com Cressie (1991), a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, é conveniente apenas que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as estimativas pela krigagem, as quais são baseadas nos valores médios (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989). Assim, a análise exploratória dos dados torna possível admitir, a princípio, se as distribuições são suficientemente simétricas ou não para o estudo geoestatístico.

Através da análise descritiva observou que o CV obtido dos dados permitiu caracterizar as três frações granulométricas, a inclinação máxima e a altitude como de média variação ($12 \leq C.V \leq 60\%$) e a fração argila+silte de baixa variação ($CV < 12\%$), de acordo com o critério de Warrick e Nielsen (1980) citado por Silva et. al. (2012).

4.1 Análise espacial das frações granulométricas na camada 0 a 30 cm, das correlações da areia com a altitude e com a inclinação máxima e correlação da argila+silte com a CAD na área do pivô da Fazenda.

Tabela 3 - Parâmetros, índice de dependência espacial (IDE%), modelos teóricos ajustados dos variograma simples e variograma cruzado dos atributos

Variáveis	Parâmetros							
	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A (m)	SQR	r ²	IDE (%)	Validação
								Cruzada
								R
argila	Exp.	43,3	141,9	201	882	0,58	69	0,65
silte	Esf.	73,0	146,1	729	610	0,9	50	1,03
areia	Gaus.	31,5	72,95	810,6	332	0,88	56	1,02
argila + Silte	Gaus.	31,8	74,18	843,5	332	0,88	57	1
-----densidade amostral 20x20m-----								
areia X inclinação máxima	Gaus.	-0,01	-9,69	313	102	0,57	99	0,54
areia X altitude	Gaus.	1,2	73,4	938,7	277	0,96	98	0,38
-----densidade amostral 40x40m-----								
areia X inclinação máxima	Gaus.	-0,01	-9,69	313,5	102	0,57	99	0,54
areia X altitude	Gaus.	1,2	73,4	938,7	277	0,96	98	0,38
-----Área do Pivô-----								
CAD X argila+silte	Esf.	-2,89	-8,77	338	73,4	0,84	67	0,84

*Exp. - Exponencial; Esf. - Esférico; Gaus. - Gaussiano; C₀ - efeito pepita; C₀+C - patamar; A - alcance efetivo (m); SQR - Soma dos quadrados dos resíduos; r² - coeficiente de determinação; IDE - índice de dependência espacial segundo Zimback(2001) e R - coeficiente de correlação.

De acordo com a tabela acima os modelos que mais se ajustaram as frações da argila, silte, areia e argila+silte foram o exponencial, esférico e o gaussiano, respectivamente. Embora alguns autores (TRANGMAR et al., 1987; PAZ et al., 1997) afirmam que o modelo esférico é o mais ajustado para descrever o comportamento dos variogramas dos atributos dos solos, sendo o patamar e o alcance nesse modelo bem definidos e geralmente o efeito pepita é pequeno em relação a este patamar (LAMPARELLI et al., 2001). Cambardella et al. (1994); Salviano et al., (1998) e Carvalho et al.(2003) falam que os modelos esféricos e exponenciais apresentam-se como os modelos teóricos mais comuns aos atributos do solo.

Os modelos dos variogramas foram considerados a partir dos valores da menor SQR (Soma dos quadrados do resíduo), maior r² e o coeficiente de correlação da validação cruzada. Robertson (1998) afirma que a SQR é um parâmetro mais robusto do que o r², propiciando uma medida exata de qual modelo melhor se ajusta aos dados.

A análise dos variogramas simples e cruzados para os atributos em estudo e as correlações, foi constatada uma baixa anisotropia, ou seja, a variabilidade espacial dos dados ocorreu de maneira bem próxima em todas as direções.

4.1.1 Variogramas das frações granulométricas

Na Figura 10 são apresentados os variogramas para o teor da argila, silte, areia e argila + silte.

Figura 10 - Variogramas da fração argila (A), silte (B), areia (C), argila+silte (D) na profundidade de 0 - 0,30m

A dependência foi analisada por meio da relação em porcentagem entre o componente estrutural e o patamar com o objetivo de avaliar o grau de dependência espacial (ZIMBACK, 2001).

O modelo ajustado para o variograma para a argila (Figura 10A) foi o exponencial com um alcance igual a 201m, o alcance informa até qual distância existe dependência espacial, ao ultrapassá-la considera-se a existência da independência estatística entre amostras. Quanto à proporção espacial, segundo Zimback (2001), o índice de dependência espacial (IDE) encontrado foi de 69%, ou seja, há uma moderada dependência espacial entre os pontos amostrados para a fração argila na área, mesmo em tipos de solos diferentes.

O modelo que mais se ajustou ao variograma para a fração silte (Figura 10B) foi o esférico, com um alcance de 729m, o variograma indicou um IDE de 50%, ou seja, moderada

dependência entre as amostras. Para o variograma da fração areia (10C), o modelo que mais se ajustou foi o gaussiano, com o alcance de 810m e com um IDE de 56%. Para o variograma conjugado argila+silte, o modelo que mais se ajustou foi o gaussiano (10D), com alcance efetivo de 843m e com IDE de 57%.

Para todos os variogramas foi observado um alcance superior das frações granulométricas a distância mínima das áreas sub-amostradas de 50x50m, ou seja, a partir de um raio médio de 201m não se observou variabilidade das frações granulométricas, indicando a amplitude de correlação espacial entre as observações de cada variável estudada dentro de um arranjo amostral maior.

4.1.2 Cokrigagem entre os parâmetros através do variograma cruzado entre areia versus altitude e areia versus inclinação máxima na densidade amostral 20x20m e 40x40m, respectivamente.

Antes de aplicar a cokrigagem entre areia e os parâmetros de altitude e inclinação máxima para cada arranjo amostral foi necessário uma análise de correlação entre a areia com cada parâmetro, onde, observou-se uma baixa correlação da fração areia com a altitude para ambos os arranjos (20x20m e 40x40m), apresentando um $r^2 = 0,2$ para as condições da área experimental, embora, não houve uma expressiva correlação entre essas variáveis, há estudos que indicam que em regiões mais altas há uma presença maior da fração areia pela relação morfo-pedogênese, todavia, para as condições desse estudo, a altitude foi insuficiente, como resposta a esse fenômeno de deslocamento de partículas, sugere-se uma análise associada a inclinação máxima do terreno, podendo fornecer uma resposta satisfatória a questão discutida.

Quando correlacionada a areia com a inclinação máxima apresentou para ambos os arranjos amostrais (20x20m e 40x40m) um $r^2 = -0,41$, houve baixa correlação da areia e a inclinação máxima, também foi observada uma tendência decrescente entre causa e efeito, indicando que uma inclinação menor favorece uma maior concentração de areia. Isso se deve, porque em áreas de declive mais acentuado, há um deslocamento das partículas mais finas, como a argila, para regiões de maior estabilidade, ou seja, área de superfícies mais planas. Portanto, pode-se indicar um efeito do fluxo acumulado de água, resultante da inclinação do terreno, como agente condicionante da presença maior do atributo areia nas condições observadas.

4.1.3 Análise do variograma cruzado entre areia versus altitude e areia versus inclinação máxima na densidade amostral 20x20m.

Na Figura 11 serão apresentados os variogramas cruzados da areia versus altitude e areia versus inclinação máxima pela cokrigagem.

Variograma cruzado: areia(variável primária) x altitude (covariável)

A

Variograma cruzado: areia(variável primária) x inclinação(covariável)

B

Figura 11 - Variograma cruzado da areia versus altitude (A), areia versus inclinação máxima no ponto amostral (B).

4.1.4 Análise do variograma cruzado entre areia versus altitude e areia versus inclinação máxima na densidade amostral 40x40m.

Variograma cruzado: areia(variável primária) x altitude(covariável)

A

Variograma cruzado: areia(variável primária) x inclinação(covariável)

B

Figura 12 - Variograma cruzado da areia versus altitude (A), areia versus inclinação máxima no ponto amostral (B)

Como não houve diferença significativa entre os variogramas cruzados para os parâmetros geoestatísticos (efeito pepita, patamar) tanto da areia x altitude, como a areia x

inclinação máxima, foi analisado conjuntamente a correlação da areia x altitude e areia x inclinação para as densidades amostrais 20x20 e 40x40m.

Os variogramas cruzados da areia versus altitude (Figuras 11A e 12A) e areia versus inclinação máxima (Figura 11B e 12B) para as duas densidades amostrais 20x20 e 40x40m foram semelhantes, não alterando a distribuição espacial dos atributos.

Para os variogramas cruzados da areia versus altitude e areia versus inclinação máxima, o modelo gaussiano foi o que mais se ajustou para todos, apresentando um alcance de 277 e 102m, respectivamente para ambas as densidades amostrais.

O variograma cruzado areia versus altitude não apresentou um patamar bem definido, isso pode implicar numa incerteza do alcance real para a análise de dependência das amostradas, quando correlacionadas.

4.1.5 Mapas gerados dos variogramas das frações granulométricas

Figura 13- Concentração do teor de argila (A), teor de silte (B), teor de areia (C), teor de silte+argila (D) pelo método de interpolação da krigagem

De acordo com os mapas foram interpretados os padrões de distribuição das frações granulométricas.

Na Figura 13A a fração argila apresentou uma distribuição em seu teor mais acentuada na face norte, nordeste e sudoeste da fazenda, regiões que compreendem os solos: Argissolo vermelho distrófico, Nitossolo vermelho distrófico, Cambissolo háplico Tb. (baixa atividade da fração argila) distrófico e o Complexo Nitossolo vermelho eutrófico, solos estes, quando presentes em áreas com declividade mais acentuada, são mais susceptíveis a erosão, influenciado pelo fluxo acumulado de água que pode corroborar a uma presença maior de areia nesse quadro.

Já o silte (Figura 13B) praticamente concentrou-se nas regiões mais baixas da fazenda, as áreas que compreendem o maior teor dessa fração são: o Complexo Nitossolo vermelho eutrófico, Cambissolo háplico Tb. Distrófico, Argissolo vermelho-amarelo e Argissolo

vermelho-amarelo eutrófico. Esses solos se encontram nas regiões mais baixas da fazenda, onde, através do mapa indica uma deposição do teor de silte, resultante da erosão dos solos à vertente dessa região. Resultado semelhante foi encontrado também por Burak e Passos (2011) onde observaram que o fluxo acumulado, influenciado pelo relevo, favorece a presença da areia grossa principalmente na camada superficial, devido ao enriquecimento residual, uma vez que partículas finas do tamanho de argila são mais facilmente transportadas pelo maior fluxo acumulado decorrente da maior inclinação do terreno para a parte inferior da área do estudo

Comparando a distribuição da fração areia (Figura 13C) com a fração argila+silte (Figura13D), foi visualizada como era de se esperar a proporção inversa da distribuição dessas frações.

4.1.6 Mapas gerados dos variogramas cruzados da fração areia versus a inclinação máxima e da fração areia versus altitude para as densidades amostrais 20x20 e 40x40m

Figura 14 - Distribuição da fração areia versus a inclinação máxima na densidade amostral 20x20m (**A**) e na densidade amostral 40x40m (**B**), distribuição da fração areia versus a altitude na densidade amostral 20x20m(**C**), e na densidade amostral 40x40m (**D**) pelo método de interpolação da cokrigagem

De acordo com os mapas foram interpretados os padrões de distribuição da areia correlacionada com a inclinação máxima e da areia com a altitude.

Como se apresenta no mapa da correlação da areia versus inclinação máxima (Figura 14A), em áreas com uma inclinação mais acentuada, normalmente há uma concentração maior de partículas mais grossas, como a areia, e nas áreas com mínima inclinação do terreno, maior estabilidade, normalmente há uma maior concentração da fração argila e silte. Pode-se observar também que não houve diferença significativa visual entre os mapas de densidade

amostral 20x20 e 40x40m. Fato observado também para as figuras 14C e 14D, em relação a altitude. Além do mais estes últimos mapas não apresentaram uma distribuição espacial da areia versus altitude bem definida, talvez pela baixa correlação entre as duas variáveis.

4.1.7 - Análise da correlação entre CAD e o teor de argila+silte

Figura 15 – Correlação do teor de argila+silte e a CAD

Há uma forte correlação entre a fração argila+silte e a CAD apresentando um $R = -0.96$, resposta já encontrada também por Arruda et al. (1987). e Coelho et. al. (1998), os autores enfatizam que as propriedades físicas influenciam diretamente na disponibilidade hídrica de um área.

4.1.8 - Análise do variograma cruzado entre a fração argila+silte e a CAD na área do pivô

Figura 16 - Variograma cruzado da areia versus altitude (A), areia versus inclinação máxima no ponto amostral

Para o variograma da argila+silte com a CAD, o modelo que mais se ajustou foi o esférico, com alcance de aproximadamente 338m, ou seja, num raio de 338m o teor de argila+silte tem dependência espacial e conseqüentemente a CAD dentro desse raio pode variar muito pouco.

4.1.9 Mapa do pivô gerado do variograma cruzado da CAD (30 cm de profundidade) e a fração argila+silte

Na Figura 17 é apresentado o mapa do pivô na Área experimental da Fazenda Areão com a CAD (30 cm de profundidade) versus teor da argila+silte.

Figura 17 – Mapa da CAD espacializada em relação a fração argila+silte.

O entendimento das relações entre atributos físicos e hídricos e diferentes segmentos da paisagem tornam-se importantes para o manejo, uma vez que a retenção de água, aeração, adsorção de íons interferem no comportamento da cultura. Isto foi eficientemente realizado por meio da avaliação da distribuição espacial dos atributos físicos e hídricos estudados e dos parâmetros geomorfológicos quantificáveis extraídos do modelo numérico de terreno (MNE).

O estudo de áreas com diversos tipos de solo e com faces heterogêneas de relevo favorecem o entendimento dos atributos que interferem no desempenho das culturas e dos seus procedimentos de manejo, como aplicação da irrigação em lâminas diferenciadas, técnica de conservação do solo, conseqüentemente, a eficiência do uso dos recursos naturais.

5 CONCLUSÕES

Na área de estudo, os atributos argila, silte e areia apresentaram uma variabilidade e uma dependência espacial moderada, mesmo nas condições de heterogeneidade de solo e faces diversas de relevo.

De acordo com os parâmetros da variância cruzada a distribuição espacial da fração areia correlacionada com a altitude e com a inclinação máxima não houve diferença em relação aos níveis de densidade amostral 20x20 e 40x40m, conforme apresentado visualmente nos mapas gerados.

Para a correlação da fração areia e o parâmetro geomorfológico da declividade, inclinação máxima, pode-se concluir que a inclinação influenciou no arranjo espacial de distribuição das frações granulométricas entre as densidades amostrais 20x20 e 40x40m, atendo a hipótese inicial do trabalho.

Para a condição da relação altitude versus distribuição da fração granulométrica, não apresentando um padrão de distribuição definido em nenhuma das densidades amostrais.

Fazem necessárias pesquisas envolvendo outras variáveis, obtidas por métodos mais sofisticados como a reflectometria, correlacionando as mesmas com as frações granulométricas para densidades amostrais variadas.

REFERÊNCIAS

- ARRUDA, F. B.; ZULLO JR., J.; OLIVEIRA, J. B. de. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:11-15, 1987.
- BABALOLA, O. Spatial variability of soil water properties in tropical soils of Nigeria. *Soil Science*, Baltimore, v. 126, n. 5, p. 269-279, 1978.
- BLAIS, R.A.; CARLIER, P.A. **Applications of geostatistics in ore evaluation. Canadian Institute of Mining and Metalurgy, Ore Rreserve estimation and grade control.** Montrel, 1968, special v.9, p. 41-48.
- BLASZCZYNSKI, J. S. Landform characterization with geographic information Systems. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, Mariland, v.63, n.2, p.183-191, 1997.
- BOUMA, J.; STOORVOGEL, J.; ALPHEN, B.J. van; BOOLTINK, H.W.G. Pedology, precision agriculture, and the changing paradigm of agricultural research. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, n.6, p.1763-1768, 1999.
- BURAK, D.L.; PASSOS, R.R.; Variabilidade espacial das frações texturais e da porosidade do solo em relevo ondulado sob cultivo de café conilon. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.7, n.12, p.1-11, 2011
- CAMARGO, O.A. de; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônômico de Campinas.** Campinas: Instituto Agrônômico, 1986. 94p. (Boletim Técnico n.106).
- CAMARGO, E.C.G. **Desenvolvimento, Implementação e Teste de Procedimentos Geoestatísticos (Krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING).** 1997. 237p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997.
- 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 Science Society American Journal**, Madison, v.58,p.1501-1511, 1994.
- CARVALHO, M.P.; TAKEDA, E.Y.; FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, n.27, p.695-703, 2003.
- CAVALCANTE, E.G.S.; ALVES, M.C.; SOUZA, Z.M. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**,Campinas, n.31, p.1329-1339, 2007.
- CICHOTA, R.; LIER, Q. de J. van; LEGUIZAMÓN ROJAS, C.A. Variabilidade espacial da taxa de infiltração em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.5, p.789-798, 2003
- CRESSIE, N. Statistics for spatial data. New York: John Wiley, 1991. 900p.

DANIELS, R.B.; NELSON, L.A. Soil variability and productivity: Future developments. In: BOERSMA, L.L. Future developments in soil science research. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, n.2, p.279-291, 1987.

EGUCHI, E.S. SILVA, E.L.da; OLIVEIRA, M.S. de. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.242-246, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (Documentos, 1).

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. – Rio de Janeiro : EMBRAPA-SPI, 2009. 412p.

GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V.; VIEIRA, S.R. Padrões de amostragem e intensidade de krigagem na caracterização do armazenamento de água no solo, em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.485-95, 1999.

GONÇALVES, A.C.A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação**. 1997. 118p. Tese (Doutorado na área de irrigação) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

GONÇALVES, A.C.A. FOLEGATTI, M.V., MATA, J. D.V., Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum**. Maringá, v. 23, n. 5, p. 1149-1157, 2001

GOOVAERTS, P. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. New York, NY :Oxford Univ. Press,. 1997. 483p.

GREGO, C.L.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.2, p.169-177, 2005.

GRIPP, A.H., Utilização de Geoestatística para o tratamento de dados de Prospeção Geoquímica. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.22, n.2, p.248-251, 1992

GUERRA, T.A.G. Geoestatística operacional. Brasília: Ministério das Minas e Energia, Departamento de Produção Mineral, 1988. 145p.

HAMLETT, J.M. HORTON, R.; CRESSIE, N. Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analyses. . **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 868-875, 1986.

HARTEMINK, A.E. Soil science in tropical and temperate regions — some differences and similarities. *Advances in Agronomy* v.77, p. 269–292, 2002

ISAAKS, E.H.;SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

- JAKOB, A.A.E. **Estudo da correlação entre mapas de propriedades de solo e mapas de produtividade para fins de agricultura de precisão.** 1999. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, C.J. **Mining geostatistics.** London: Academic Press, 1978. 600p.
- KÖPPEN, W. **Grundriss der Klimakunde.** Berlin:Walter D E Guyter 1931. 390p.
- LAMPARELLI, R.A.C.; ROCHA, J.V.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações.** Guaíba: Agropecuária, 2001. 118p.
- LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos.** São Paulo:Ed. UNESP, 1998. 226p.
- LANDIM, P.M.B. STURARO, J.R.; MONTEIRO, R.C. Exemplos de aplicação da cokrigagem. DGA, IBGE, UNESP/Rio Claro, Laboratório Geomatemática, Texto Didático 09, 17p. 2002. Disponível em: [HTTP://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html](http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html), acesso em: 05 fev.2010.
- LEMOS, R.C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solos no campo.** 3.ed. Campinas:Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 84p.
- MARQUES Jr.J. Variabilidade espacial de propriedades químicas e físicas de Latossolos em áreas de Cerrado sob cultivo de café, em Patrocínio, MG. In: BALASTREIRE, L.A. **O estado da arte da agricultura de precisão no Brasil.** Piracicaba:ESALQ, 2000. p.165-169.
- MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I.F. Depósitos superficiais neoceno-zóicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. **Geociências**, São Paulo, v.19, p.265-281, 2000.
- MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications.** Paris:Les Cahiers Du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleu, 1971. 211p.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology, Lancaster**, v.58, n.8, p.1246-1266, 1963.
- McBRATNEY, A.B.; MENDONÇA SANTOS, M.L., MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v.117, p.3-52, 2003.
- McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties? **Soil Science**, Baltimore, v.135, n.3, p.177-183, 1983.
- MENDES, C. A. B., CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação.** Porto Alegre: ABRH, 2001. cap. 2. p. 57-111.
- MINASNY BUDIMAN, ALFRED E. HARTEMINK. Predicting soil properties in the tropics. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam, v.106 p.52-62, 2011
- MOURA, A.L. Uma Proposta para a Triangulação de Delaunay 2D e Localização Planar de Pontos em OCaml / André Luiz Moura. – Uberlândia, 2006. 114p.

PAZ, V.P.S. FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A.; FOLEGATTI, M.V. Redução da receita líquida por déficit ou excesso de água na cultura do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 9, p. 869-875, 1997.

QUEIROZ, J.E. **Parâmetros hidro-dinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea**. 1995. 167p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

Relatório de apresentação do diagnóstico para a elaboração do plano diretor socioambiental participativo do campus “Luiz de Queiroz”, Piracicaba/SP(2006), disponível em site: http://www.esalq.usp.br/instituicao/docs/plano_socio_ambiental_etapa1.pdf.

RIBEIRO JUNIOR, P.J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. 1995. 99p. Dissertação (Mestre em Agronomia) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

RICHARDS, L.A.; FIREMAN, M. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. **Soil Science**, New Brunswick, v.56, p.395-404, 1943.

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

ROBERTSON, G.P. **GS⁺: Geostatistics for the environmental sciences**. Versão 5.03 Beta, Plainwell, Gamma Design Software, 1998. 152p.

SALVIANO, A.A.C.; VIEIRA, S.R. & SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* (L.) em área severamente erodida. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, p.115-122, 1998.

SANCHEZ, P.A.; BUOL, S.W. Soils of the tropics and the world food crisis. **Science**, v. 188, p.598–603, 1975.

SILVA, A.P. **Tese Variabilidade espacial de atributos físicos do solo**. 1988. 104p.(Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

SILVA JUNIOR, R.L. **Variabilidade espacial do índice de cone correlacionada com mapas de produtividade**. 2001.132p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SILVA, J.R. L. da; MONTENEGRO, A.A. A. ;SANTOS, T.E.M. dos. Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**. [online]. V.16, n.1, p. 27-36, 2012.

SIQUEIRA, G.M., VIEIRA, S.R., DECHEN, S.C.F. Variabilidade espacial da densidade e da porosidade de um latossolo vermelho eutroférico sob semeadura direta por vinte anos. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p.751-759, 2009.

Sistema Brasileiro de Classificação de solos. Editores Técnicos: Humberto Gonçalves dos Santos et al.- 2.ed. – Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 306 p, 2006.

SOUZA, L. Variabilidade Espacial do Solo em Sistemas de Manejo. 1992. 162p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P.; VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21,p. 367-372, 1998.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.;UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances Agronomy** v.38, p.45-93, 1987.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas, SP. **Bragantia**,Campinas, v.56, p.181-190, 1997.

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

VILLA NOVA, N.A. Dados agrometeorológicos do município de Piracicaba. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 1989.2p.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p.319-344.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in field. **Advances in Soil Science** ,, cidade, v.3, p.2-56, 1985.

WEBSTER, R.; BUTLER, B.E. Soil classification and survey studies at Ginninderra. **Australia Journal of Soil Research**, Collingwood, v.14, n.1, p.1-24, 1976.

WILDING, L.P.; DREES, L.R. Spatial variability and pedology. In: WILDING, L.P. Pedogenesis and soil taxonomy: I concepts and interactions. New York: Elsevier, 1983. p.83-116.

WYSOCKI, D.A.; SCHOENEBERGER, P.J. Geomorphology of soil landscapes. In: SUMMER M.E. (Ed.). London: Handbook of soil Science, 1999. p.5-38.

YOUNG, F.J.; HAMMER, R.D. Defining geographic soil bodies by landscape position, soil taxonomy, and cluster analysis. **Soil Science Society American Journal**. v. 64, p. 989-998, 2000.

ZIMBACK,R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114p.Tese de Livre-Docência (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho,” Jaboticabal, 2001.

ANEXOS

ANEXO A

Passo a passo através do SIG para a obtenção dos planos de informações dos dados georreferenciados da área da Fazenda areão

Antes do uso, propriamente do SIG, preparou e salvou os dados utilizados no programa, nesse caso, foram os mapas com as curvas de nível, dos limites do tipo e do uso do solo, digitalizados, da fazenda Areão do Campus USP/ESALQ – Piracicaba-SP, cedidos gentilmente pelo Departamento de Solos da própria instituição, e os dados das coordenadas em UTM e o percentual das frações granulométricas da área. A partir dessas informações obtiveram-se os planos de informação: MNE (modelo numérico de elevação), declividade, fluxo e direção de fluxo.

Geração do MNE

Adicionou os dados, no caso: o shapefile da altimetria.

O *shapefile* (formato) da altimetria foi baseado no mapa digitalizado das curvas de nível da Fazenda Areão.

Em seguida adicionou o *shapefile* do limite_area da fazenda, o qual foi digitalizado manualmente, através de uma imagem aérea da Fazenda.

As categorias da altimetria e o limite da área foram editados, clicou-se duas vezes na categoria desejada e se abriu uma sub-janela, onde, pode-se manipular cor, espessura da linha, etc.

Para gerar o MNE:

Abriu a caixa de ferramenta.

Em seguida abriu a caixa de ferramenta *Spatial Analyst Tools* e foi à ferramenta *Topo to Raster*.

Foi aberta a janela da ferramenta e em seguida foram informados os dados de entrada, no caso, a altimetria e limite da área.

Para o *layer* limite_area, trocou-se o tipo de *contour* para *boundary*.

E para os dados de saída no *Output surface raster*, escolheu a pasta onde foi salva e colocou a extensão *tif*, pois assim poderá ser lido em qualquer SIG.

Em seguida na mesma janela, logo abaixo, mandou gerar o MNE.

MNE gerado:

Geração do plano de informação da Declividade (inclinação)

Abriu a caixa de ferramenta *Spatial Analyst Tools*, em seguida *Surface* em seguida *Slope*.

Em seguida abriu-se uma sub-janela, onde foram informados os dados de entrada os de saída e o tipo da grandeza da informação de saída, no caso, em percentagem.

Depois mandou gerar:

O plano de informação da Declividade foi gerado:

Geração da direção de fluxo acumulado

Abriu a caixa de ferramenta *Spatial Analyst Tools*, em seguida *Hydrology* e em seguida o *flow direction*.

Em seguida foram informados os dados de entrada e de saída.

Foi gerado o plano de direção de fluxo:

O plano de informação da direção de fluxo foi gerado:

Para cada cor da legenda dessa categoria que indica um sentido, ou seja, o 1 indica para o leste, o 2 é o sudeste, até chegar no 128 que é a direção nordeste, dentro do próprio SIG, em seu *help*, encontra-se essas informações sobre as cores e suas direções.

Geração do fluxo acumulado

Para a geração do fluxo acumulado repetiu-se o mesmo procedimento, a diferença foi na ferramenta utilizada:

Abriu a caixa de ferramenta *Spatial Analyst Tools*, em seguida *Hydrology* e depois em *flow accumulation*.

O dado de entrada foi a direção de fluxo e o tipo de saída foi o *Float*.

Deu o ok para os dados:

Foi gerado o plano de informação do fluxo acumulado:

A escala indica: quanto mais escuro, menos contribuição da água dentro da área, e mais clara, maior fluxo, ou seja, maior contribuição da água na área.

Obs.: Pode ser realçado o mapa de fluxo para a impressão do plano de informação, basta clicar na categoria e ser aberta uma janela para a edição do mesmo.

Pode-se inverter a escala de cores, pode mudar a cor da rampa e mexer nos valores da escala, até achar uma apresentação do plano de informação do fluxo acumulado adequada para o trabalho.

Geração do tipo e uso do solo

Os *shapefiles* do tipo e uso do solo também foram informações gentilmente cedidas pelo Departamento de solos da ESALQ.

Mapa do tipo do solo:

Adicionou os dados: *shapefiles*

Gerou-se o mapa do uso do solo:

Mapa do uso do solo:

Para a edição dos mapas do tipo e uso do solo, bastou clicar na categoria a foi editada e aberta uma sub-janela para a edição.

Como por exemplo, para a edição do mapa de uso do solo:

Foi à simbologia:

em seguida em categoria:

A partir dessa legenda pôde-se colorir até chegar a um padrão de cores para o mapa:

Para o tipo de solo, seguiu-se o mesmo procedimento que foi utilizado para o uso de solo:

As cores utilizadas nos mapas foram segundo a carta padrão de cores da EMBRAPA (2006), com exceção das cores dos complexos de solos, onde foi pego a cor do primeiro de tipo de solo e foi rachurado.

2.6 Extrações de informações de um arranjo amostral

Foi ao *Spatial Analyst Tools* depois em *Extraction* e em seguida em *Extract values to points*.

Mandou rodar a ferramenta:

Gerado o grid de 20x20m (exemplo).

Foi averiguado os valores contidos no MNE do arranjo amostral 20x20m:

Clicou no *rastervalue*, entrou em propriedades e editou-se apenas a aparência do índice dos valores, aqui no caso, MNE ou altitude.

A partir desse procedimento puderam-se extrair outros valores do MNE, como os valores: inclinação, fluxo acumulado e outros.

ANEXO B

Tabela 1 - Dados das frações granulométricas das 146 amostras coletadas na Fazenda Areão.

UTM		Amostra	% argila	%silte	%areia	altitude	%declividade
x	y					(m)	
227700	7487700	16	61.15	13.41	25.44	531.00	3.00
227800	7487600	23	60.25	12.54	27.21	530.00	6.00
227900	7487800	34	60.13	14.51	25.37	535.00	4.00
227900	7487900	35	40.10	16.01	43.88	537.00	3.00
228000	7487800	44	28.79	37.71	33.50	535.00	3.00
228000	7487900	45	43.18	22.38	34.43	539.00	4.00
228100	7487300	48	48.54	15.67	35.79	513.00	9.00
228100	7487400	49	45.51	15.59	38.89	516.00	6.00
228100	7487800	53	42.49	21.01	36.50	534.00	4.00
228100	7487900	54	43.38	18.43	38.19	538.00	5.00
228100	7488000	55	47.84	17.92	34.24	544.00	8.00
228200	7487700	62	28.34	27.54	44.11	528.00	11.00
228200	7487800	63	42.58	26.56	30.86	530.00	8.00
228200	7487900	64	41.10	21.33	37.57	536.00	6.00
228200	7488000	65	44.56	17.52	37.93	544.00	9.00
228200	7488100	66	51.89	16.02	32.09	551.00	6.00
228300	7487400	70	41.58	21.08	37.34	522.00	9.00
228300	7487500	71	7.60	56.04	36.36	521.00	12.00
228300	7488100	77	50.00	12.82	37.17	552.00	8.00
228300	7488200	78	43.94	11.37	44.69	558.00	7.00
228400	7487300	81	18.61	46.26	35.13	524.00	8.00
228400	7487400	82	7.51	58.11	34.38	529.00	6.00
228400	7487500	83	18.27	40.63	41.10	530.00	6.00
228400	7488100	89	41.17	16.37	42.46	551.00	9.00
228400	7488200	90	35.85	15.58	48.57	557.00	5.00
228400	7488300	91	30.20	18.28	51.53	563.00	9.00
228500	7487300	93	41.06	20.09	38.86	525.00	9.00
228500	7487400	94	35.00	23.10	41.90	533.00	6.00
228500	7487500	95	34.41	24.16	41.43	535.00	3.00
228500	7487600	96	41.00	19.41	39.59	533.00	10.00
228500	7488200	102	35.44	15.40	49.15	556.00	5.00
228500	7488300	103	35.52	15.44	49.04	561.00	6.00
228500	7488400	104	42.27	14.66	43.07	565.00	3.00
228600	7487300	105	40.75	24.12	35.13	522.00	16.00
228600	7487400	106	41.53	24.33	34.14	532.00	9.00
228600	7487500	107	41.70	19.19	39.11	536.00	2.00
228600	7488200	114	38.36	16.25	45.39	555.00	3.00
228600	7488300	115	38.52	15.55	45.93	559.00	4.00
228600	7488400	116	46.43	20.20	33.36	562.00	4.00
228600	7488500	117	51.05	0.00	48.95	563.00	5.00
228700	7487400	119	37.11	26.32	36.57	526.00	10.00

UTM		Amostra	% argila	%silte	%areia	altitude	%declividade
x	y					(m)	
228700	7487500	120	38.15	30.00	31.86	535.00	9.00
228700	7487600	121	43.40	21.00	35.60	537.00	3.00
228700	7488000	125	32.98	15.81	51.21	547.00	6.00
228700	7488100	126	36.75	12.96	50.29	550.00	4.00
228700	7488200	127	32.75	16.80	50.44	553.00	5.00
228700	7488300	128	43.21	18.59	38.21	555.00	5.00
228700	7488400	129	51.74	13.24	35.02	557.00	8.00
228700	7488500	130	47.85	20.22	31.93	558.00	6.00
228700	7488600	131	7.49	55.06	37.44	559.00	4.00
228800	7487500	133	19.88	42.80	37.32	525.00	19.00
228800	7487600	134	1.90	64.90	33.20	535.00	10.00
228800	7487700	135	28.25	26.32	45.43	540.00	6.00
228800	7488000	138	32.90	22.42	44.68	546.00	4.00
228800	7488100	139	38.06	18.08	43.86	546.00	6.00
228800	7488200	140	36.65	18.07	45.28	547.00	8.00
228800	7488300	141	45.29	20.40	34.30	547.00	12.00
228800	7488400	142	55.47	19.36	25.17	546.00	13.00
228800	7488500	143	55.75	15.71	28.54	550.00	12.00
228900	7487600	146	31.08	30.54	38.38	520.00	17.00
228900	7487700	147	19.61	42.22	38.18	531.00	20.00
228900	7488000	150	2.62	61.23	36.14	539.00	14.00
228900	7488100	151	35.85	19.74	44.41	536.00	17.00
228900	7488200	152	48.12	16.91	34.97	537.00	11.00
228900	7488300	153	53.70	14.85	31.45	536.00	10.00
228900	7488400	154	57.90	16.71	25.39	536.00	10.00
229000	7487900	160	45.92	22.87	31.21	522.00	19.00
229000	7488000	161	47.75	20.93	31.32	522.00	23.00
229000	7488100	162	49.94	17.23	32.83	520.00	12.00
229000	7488200	163	47.65	20.57	31.78	521.00	18.00
229000	7488300	164	41.11	22.90	35.99	523.00	12.00
229100	7487900	169	62.34	12.16	25.50	507.00	14.00
229100	7488100	171	47.58	17.58	34.83	509.00	11.00
229100	7488200	172	25.50	30.74	43.76	507.00	11.00
229200	7488000	177	52.00	15.50	32.50	498.00	7.00
227900	7487450	265	43.17	19.31	37.52	521.00	5.00
227900	7487500	266	48.18	25.22	26.61	521.00	8.00
227950	7487450	297	45.43	23.86	30.71	520.00	7.00
227950	7487500	298	38.82	25.70	35.47	522.00	7.00
227950	7487550	299	30.05	23.73	46.23	524.00	11.00
227950	7487600	300	37.63	19.99	42.37	525.00	13.00
227950	7487650	301	49.14	18.53	32.34	525.00	4.00
227950	7487700	302	46.86	21.44	31.70	529.00	12.00
228000	7487450	329	36.71	23.59	39.71	521.00	6.00
228000	7487550	331	36.06	21.25	42.69	526.00	5.00

UTM		Amostra	% argila	%silte	%areia	altitude	%declividade
x	y					(m)	
228000	7487600	332	34.89	35.55	29.56	528.00	6.00
228000	7487650	333	52.91	20.32	26.77	530.00	8.00
228000	7487700	334	33.05	28.25	38.70	532.00	4.00
228050	7487450	361	32.73	23.01	44.26	520.00	5.00
228050	7487500	362	40.34	17.12	42.55	523.00	6.00
228050	7487550	363	35.32	23.55	41.13	525.00	7.00
228050	7487600	364	47.28	18.87	33.86	529.00	7.00
228050	7487650	365	55.45	24.36	20.19	531.00	2.00
228050	7487700	366	36.25	27.27	36.48	532.00	3.00
228100	7487450	393	35.07	19.72	45.21	518.00	8.00
228100	7487500	394	42.05	16.94	41.00	521.00	6.00
228100	7487550	395	49.19	12.67	38.14	524.00	6.00
228100	7487600	396	52.53	17.40	30.07	528.00	11.00
228150	7487550	427	64.54	10.55	24.91	522.00	7.00
228250	7487100	482	10.19	52.77	37.04	501.00	10.00
228250	7487150	483	18.46	41.64	39.90	504.00	16.00
228250	7487200	484	63.00	8.33	28.67	508.00	12.00
228250	7487250	485	18.65	48.46	32.90	510.00	13.00
228250	7487300	486	35.43	23.60	40.97	513.00	15.00
228250	7487350	487	54.54	17.63	27.83	515.00	11.00
228300	7487150	515	56.76	13.10	30.14	508.00	11.00
228300	7487200	516	42.24	20.18	37.58	512.00	11.00
228300	7487250	517	36.03	26.20	37.77	516.00	9.00
228300	7487300	518	44.28	23.42	32.31	518.00	9.00
228300	7487350	519	22.62	46.71	30.67	520.00	9.00
228350	7487100	546	40.58	22.32	37.10	505.00	11.00
228350	7487150	547	32.60	22.97	44.43	510.00	11.00
228350	7487200	548	34.57	19.81	45.62	515.00	8.00
228350	7487250	549	54.41	16.17	29.42	519.00	9.00
228350	7487300	550	41.28	23.84	34.88	522.00	8.00
228400	7487150	579	52.25	14.57	33.19	511.00	11.00
228400	7487200	580	33.16	25.35	41.49	516.00	9.00
228400	7487250	581	11.05	62.40	26.54	521.00	7.00
228400	7488000	596	40.36	14.22	45.43	539.00	12.00
228400	7488050	597	42.21	12.54	45.25	545.00	12.00
228450	7487150	611	21.32	38.98	39.71	511.00	11.00
228450	7487200	612	52.81	13.39	33.80	516.00	9.00
228450	7487250	613	40.21	20.54	39.25	521.00	9.00
228450	7488050	629	44.27	9.95	45.79	544.00	14.00
228450	7488100	630	37.52	15.42	47.06	550.00	10.00
228500	7487200	644	27.62	38.97	33.41	515.00	12.00
228500	7487250	645	24.99	35.05	39.96	520.00	10.00
228500	7487900	658	34.43	22.26	43.32	531.00	14.00
228500	7487950	659	35.19	11.47	53.34	532.00	16.00

UTM		Amostra	% argila	%silte	%areia	altitude	%declividade
x	y					(m)	
228500	7488000	660	49.14	10.49	40.37	540.00	14.00
228500	7488100	662	38.03	15.63	46.34	550.00	8.00
228550	7487200	676	36.77	25.75	37.48	510.00	20.00
228550	7487250	677	52.04	18.05	29.91	518.00	15.00
228550	7487950	691	56.33	16.12	27.55	538.00	17.00
228550	7488000	692	39.81	11.17	49.02	542.00	8.00
228550	7488050	693	42.98	11.40	45.62	546.00	10.00
228550	7488100	694	41.76	12.72	45.52	550.00	6.00
228600	7487300	710	37.70	16.73	45.57	525.00	6.00
228600	7488000	724	37.11	9.82	53.07	543.00	6.00
228600	7488050	725	43.00	12.70	44.31	547.00	9.00
228600	7488100	726	40.75	11.43	47.82	551.00	5.00
228650	7487950	755	43.22	14.15	42.63	544.00	5.00
228650	7488000	756	28.91	12.49	58.60	545.00	5.00
228650	7488050	757	39.78	12.54	47.67	548.00	7.00
228650	7488100	758	37.45	14.00	48.55	551.00	5.00
228700	7487950	787	29.19	11.43	59.37	546.00	4.00

OBS.: A profundidade da amostragem foi de 0,30 m.