**ABORDAGEM QUANTITATIVA NA PREDIÇÃO ESPACIAL
DE ATRIBUTOS DO SOLO E GERAÇÃO DE
ZONAS DE MANEJO AGRÍCOLA**

MARCIA FREIRE MACHADO SÁ

Engenheira Agrônoma

Orientador: Prof. Dr. **KLAUS REICHARDT**

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade
de São Paulo, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia, Área de Concentração: Solos e
Nutrição de Plantas.

PIRACICABA

Estado de São Paulo – Brasil

Janeiro - 2001

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

Sá, Marcia Freire Machado

Abordagem quantitativa na predição espacial de atributos do solo e geração de zonas de manejo agrícola / Marcia Freire Machado Sá. -- Piracicaba, 2001.

117 p.

Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2001.

Bibliografia.

1. Agricultura de precisão 2. Análise de regressão 3. Fertilidade do solo 4. Manejo solo
5. Propriedade físico-química do solo 6. Relação solo-paisagem 7. Variabilidade espacial I.

Título

CDD 631.4

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

Dedico este trabalho
a meus pais, José e Leda, pelo seu amor e constante incentivo,
ao meu esposo Juca, por seu companheirismo e confiança
e aos meus filhos Cássia e Daniel, fonte de inspiração e força
para abraçar os desafios

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos às pessoas e instituições que tornaram possível a realização deste trabalho:

Ao Prof. Dr Klaus Reichardt pela orientação, confiança e amizade;

Ao Prof. Dr. Brian K. Slater, pela orientação durante o período que permaneci na The Ohio State University desenvolvendo habilidades em *softwares* que possibilitaram a conclusão deste trabalho;

À Empresa Lucio Miranda Empreendimentos Agropecuários, e particularmente ao Sr. Lúcio, pelo apoio e suporte irrestrito durante a fase de coleta das amostras de solo na Fazenda Santa Branca. Agradecimento extendido ao Eng. Agrônomo Paulo Sérgio Assumpção e, especialmente, ao Eng. Agrônomo Jorge do Rocio Ferreira e toda a equipe de campo da fazenda por me acompanharem na árdua tarefa de amostragem dos solos;

Ao proprietário da Fazenda Pousada dos Gaúchos, Sr. Ivo Arnt Filho pela permissão de acesso e coleta de amostras de solo nos campos nativos de sua propriedade;

Ao Prof. Dr. José Alexandre Melo Demattê pela colaboração durante a etapa de elaboração do projeto inicial deste trabalho;

À equipe técnica dos laboratórios de Física e Mineralogia dos Solos da ESALQ-USP (Bete, Wladimir e Luciano) e Física dos Solos do CENA-USP (Dudu e Ademir) pela amizade e companheirismo;

À Universidade Estadual de Ponta Grossa e à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, pela oportunidade de realização do curso de doutorado;

À The Ohio State University, School of Natural Researches, pela oportunidade de realização do “doutorado sandwich”;

À CAPES, pelo suporte através de concessão de bolsa de estudo “doutorado sandwich”;

À FAPESP, pela concessão de auxílio financeiro à execução do projeto;

Aos colegas do Depto de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola da UEPG pelo suporte durante o período de minha ausência. Agradecimentos especiais ao Prof. Dr. Altair Justino por se encarregar de meus negócios pessoais durante o tempo de permanência no exterior;

Ao amigo, colega e esposo João Carlos (Juca) pela imensurável ajuda, força e compreensão, em cada passo da realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	xii
SUMMARY.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Paradigmas e Pedologia.....	3
2.2 Em direção à modelagem quantitativa da diversidade dos solos.....	5
2.2.1 Estruturas de classificação.....	5
2.2.2 Modelos de organização do <i>continuum</i> solo-paisagem.....	6
2.3 Indivíduos, entidades, e corpos de solos.....	8
2.4. Relações solo-paisagem e modelagem.....	9
2.4.1 Perspectiva histórica.....	9
2.4.2 Modelos de solo-paisagem.....	10
2.4.3 Uma de uma nova estrutura espacial para modelar a diversidade dos solos....	11
2.5 Predição de propriedades dos solos a partir de modelos contínuos da relação solo-paisagem.....	12
2.5.1 Modelo de Elevação Digital (DEM).....	12
2.5.2 Atributos Topográficos.....	13
2.6 Uso da classificação contínua na pedologia.....	15
2.7 Geoestatística.....	18
2.8 Agricultura de precisão.....	18
3 PREDIÇÃO DE ATRIBUTOS DE SOLOS ATRAVÉS DE ANÁLISES TOPOGRÁFICAS EM TOPOSSEQUÊNCIAS DA REGIÃO DOS “CAMPOS GERAIS”/PR.....	21
3.1 RESUMO.....	21
3.2 SUMMARY.....	22
3.3 INTRODUÇÃO.....	22
3.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	25

3.4.1 Caracterização geral da área.....	25
3.4.2 Modelo de Elevação Digital (DEM) e Atributos Topográficos.....	27
3.4.3 Metodologia de amostragem e análise de solo e plantas	28
3.4.4 Análises Estatísticas e Obtenção de Curvas de Isolinas de Atributos do Solo	30
3.4.5 Relações entre atributos dos solos e topográficos	31
3.4.6 Classificação contínua ou fuzzy.....	31
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
3.6 CONCLUSÕES.....	52
4 VARIABILIDADE DA FERTILIDADE DO SOLO EM TOPOSSEQUÊNCIAS DA REGIÃO DOS “CAMPOS GERAIS”-PR: AVALIANDO O POTENCIAL PARA O GERENCIAMENTO LOCALIZADO DE FERTILIZANTES.....	53
4.1 RESUMO.....	53
4.2 SUMMARY.....	54
4.3 INTRODUÇÃO.....	54
4.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	57
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
4.5.1 Perfis de solos.....	60
4.5.2 Estatística clássica.....	61
4.5.3 Recomendação de fertilizantes.....	65
4.5.4 Rendimento do trigo.....	69
4.5.5 Geoestatística.....	70
4.6 CONCLUSÕES.....	78
5 CONCLUSÕES GERAIS.....	79
ANEXO.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

ABORDAGEM QUANTITATIVA NA PREDIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E GERAÇÃO DE ZONAS DE MANEJO AGRÍCOLA

Autora: MARCIA FREIRE MACHADO SÁ

Orientador: Prof. KLAUS REICHARDT

RESUMO

Uma combinação de ferramentas relativamente novas foi usada para identificar e caracterizar a variabilidade espacial de atributos do solo e para criar zonas de manejo agrícola. Foram selecionadas quatro topossequências representativas da região dos “Campos Gerais”-PR de acordo com o material de origem dos solos e do tempo de adoção do sistema Plantio Direto (PD) no município de Tibagi (50° 20’ W; 24 ° 26’ S). As áreas escolhidas compreendem um campo nativo e três áreas adjacentes cultivadas no sistema PD nos últimos 10 e 20 anos. Os solos foram amostrados em grades de 50,0 m de espaçamento nas profundidades 0-0,10; 0,10-0,20 m. Os dados utilizados na análise incluíram: altitude, pH, MO, Ca, Mg, K trocáveis, P, CTC, densidade do solo, argila, silte, areia e rendimento do trigo. A análise de regressão linear múltipla foi utilizada para explorar as relações entre os atributos topográficos derivados dos Modelos de Elevação Digital e atributos dos solos. Relações significativas foram encontradas entre os atributos topográficos estudados e alguns indicadores chave da fertilidade dos solos, tais como MO, CTC, conteúdo de argila e densidade do solo. A técnica “Fuzzy k-means” foi usada para agrupar valores de atributos de solos e

topográficos. Os resultados revelaram a possibilidade de definir zonas de fertilidade dos solos nas topossequências estudadas.

A fertilidade do solo foi altamente variável e muito estratificada nas três áreas estudadas. Os teores de MO, Ca e Mg trocáveis aumentaram de acordo com o teor de argila dos solos. Em geral, a maior variabilidade espacial foi observada na área PD20. O rendimento do trigo apresentou variações, porém, neste ano agrícola, houve baixa correlação desta variável com a fertilidade do solo.

Os atributos dos solos mostraram diferenças na dependência espacial. Modelos geoestatísticos anisotrópicos lineares foram definidos para a maioria das variáveis estudadas. O conteúdo de MO foi a variável que apresentou maior dependência espacial, seguida pelo K e Ca trocáveis. A quantidade de fertilizantes recomendada seria similar na aplicação uniforme (convencional) e no manejo localizado de fertilizantes, mas a distribuição de fertilizantes nas áreas seria espacialmente diferente.

QUANTITATIVE APPROACH ON SPATIAL PREDICTION OF SOIL ATTRIBUTES AND CROP MANAGEMENT ZONE GENERATION

Author: MARCIA FREIRE MACHADO SÁ

Adviser: Prof. KLAUS REICHARDT

SUMMARY

A combination of relatively recent tools was used to identify and characterize the soil spatial variability and to create crop management zones. Four representative toposequences of the “Campos Gerais” region were selected according to parent material and no-tillage management period in the Santa Branca farm (50° 20’ W; 24 ° 26’ S), southern of Brazil. Chosen areas consisted of an undisturbed native field and three adjacent sites cultivated under no-tillage system for the past 10 and 20 years. Surface soil samples of the 0-0,10; 0,10-0,20 m depths were sampled in a 50,0 m grid. Data used in this analysis included: altitude, pH, OM, Ca, Mg, P, K soil tests, soil bulk density, clay, silt and sand contents and wheat yield. Multiple linear regression analysis was performed to explore the relationship between topographic attributes derived from Digital Elevation Model and soil attributes. Significant relationships were found between terrain attributes and some key indicators of soil fertility such as OM, CEC, clay and bulk density. The fuzzy k-means technique was used as a method of grouping selected soil and terrain attributes. The results defined useful clusters of soil potential fertility.

Soil fertility was highly variable and very stratified for three studied sites. The values of OM content and exchangeable Ca and Mg increased according to the clay content of the sites. In general the highest spatial variation was observed in the NT20 site. Wheat yield was highly variable but there was little correlation with soil fertility.

The soil properties displayed differences in spatial dependence. Linear anisotropic geostatistical models were defined for most of the soil variables measured for all sites. OM was the variable with more spatial dependence, followed by K and Ca. Total fertilizer recommendation was similar for uniform versus soil specific management, but the distribution of fertilizer within the field would be spatially different.

1 INTRODUÇÃO

O solo é um dos principais fatores a ser considerado em relação à sustentabilidade agro-ecológica por ser a base da produção de alimentos para a humanidade, principalmente quando os prognósticos apontam para a duplicação da população mundial e uma demanda triplicada de produção de alimentos nos próximos cinquenta anos.

Partindo-se do princípio de que o solo é um recurso natural não renovável à curto prazo e que se encontra disponível em quantidade limitada, esforços devem ser feitos no sentido de sua preservação e maximização da produtividade agrícola à nível econômico para o produtor.

A introdução do sistema plantio direto (PD) no Brasil, no início da década de 1970 foi um grande avanço em direção à sustentabilidade do sistema agrícola, melhorando a qualidade do solo e aumentando o potencial produtivo. O processo de produção no sistema PD envolve o não revolvimento do solo, a manutenção dos resíduos culturais na superfície e a rotação de culturas, contribuindo para a quase eliminação das perdas por erosão e para o aumento do conteúdo da matéria orgânica dos solos (Mondardo, 1978; Sidiras & Pavan, 1985; Derpsch et al., 1986; Blevins et al., 1997; Thomas, 1990; Sá, 1997; Kinsela, 1997).

Um novo desafio da agricultura neste novo milênio, que traz promessas de aumento de rentabilidade e benefícios ao meio ambiente emergiu nas últimas duas décadas com a Agricultura de precisão (AP) ou gerenciamento localizado da produção agrícola. Um dos requisitos para o sucesso da AP é o conhecimento da variabilidade do solo para o manejo eficiente das aplicações de fertilizantes. Hoje estão disponíveis ferramentas que possibilitam a coleta, armazenamento e análise de variadas classes de dados e informação viabilizando estudos desta natureza. Uma das maiores limitações do

gerenciamento localizado dos solos é o alto custo de obtenção de informação adequada sobre as propriedades do solo na escala adequada. Há necessidade de desenvolver-se modelos para predição de propriedades dos solos que façam o melhor uso de informações subordinadas, particularmente as de custo de obtenção relativamente baixo, tal como a topografia (Moore et al., 1991; Lark, 1999).

Assumindo-se que as relações solo-paisagem sejam preditas em processo comum, técnicas geomorfométricas podem ser usadas para derivar atributos topográficos e segmentar a paisagem em unidades de relevo. Análises de modelos de elevação digital contidas em programas de sistemas de informação geográfica permitem acurácia e agilização deste processo. Por outro lado, análises de regressão linear múltipla podem ser empregadas para explorar as relações entre os atributos do solo e topográficos, gerando modelos de predição de atributos do solo (Moore et al., 1993a).

Com o intuito de utilizar estas novas abordagens e ferramentas foi escolhida uma área representativa dos solos da região dos “Campos Gerais”, Estado do Paraná, a longo período cultivada sob o sistema PD. Este trabalho foi realizado como um passo inicial na identificação dos processos contribuintes para a variabilidade espacial de solos desta região, com distinção de material de origem e com diferenças quanto ao tempo de adoção do sistema PD.

Os objetivos deste trabalho foram: 1) verificar as alterações nos atributos do solo ao longo de topossequências com o tempo de adoção do sistema PD; 2) testar a hipótese de que as variações na paisagem, representadas por variáveis topográficas, estejam relacionadas com a variabilidade espacial de propriedades do solo; e 3) verificar o potencial de métodos de classificação contínua ou “fuzzy” como ferramenta na geração de zonas de manejo agrícola.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2. 1 Paradigmas e Pedologia

Desde o final do século passado, quando a ciência do solo foi considerada uma disciplina independente, os pedólogos tem procurado mapear, classificar e desvendar a história do recurso solo. Como o conhecimento sobre os solos tem evoluído, modelos e idéias têm surgido as quais por seu turno têm influenciado os métodos de estudo e a estrutura organizacional da disciplina.

O solo é um sistema complexo, espacialmente e temporalmente variável. Sistemas convencionais de classificação de solos frequentemente empregam classes taxonômicas hierárquicas, onde cada indivíduo-solo pertence a uma única classe em determinado nível categórico. O pedólogo de campo determina o tipo de solo e o delineamento das unidades de mapeamento. Por necessidade, seu trabalho é baseado em limitado número de observações de perfis de solos e em sua interpretação pessoal das feições da paisagem. Este procedimento tem portanto um caráter subjetivo .

As unidades de mapeamento incluem solos que não se ajustam às descrições da legenda, os quais são tratados como impurezas. Além disso, as propriedades do solo geralmente variam também dentro da “parte pura” da unidade de mapeamento. Sendo assim, a precisão na predição dos valores dos atributos em pontos não amostrados depende da variância dentro das unidades (Trangmar et al., 1985).

Os levantamentos de solos são largamente utilizados para auxiliar na determinação da aptidão dos solos para uma variedade de usos dentro de uma região, (Kuilenburg et al., 1982). No entanto, nas últimas duas décadas tem crescido o questionamento quanto a adequação destas unidades para fornecer informações para o manejo de práticas agrícolas na escala de campo. Os paradigmas que governam o estudo

dos solos estão evoluindo para refletir o avanço do conhecimento e a aplicação de ferramentas quantitativas mais sofisticadas tem sido explorada pelos pedólogos (Nielsen & Alemi, 1989; McBratney & Gruijter, 1992; Odeh et al., 1992; Slater, 1994; Irvin et al., 1997).

Geralmente o indivíduo solo tem uma distribuição mais contínua (são mais fracamente agrupados) no espaço do que o implícito no sistema hierárquico e de classes rígidas (McBratney & Gruijter, 1992). Os cientistas de solos frequentemente referem-se a pedosfera como um *continuum* (McBratney et al., 1992). Técnicas quantitativas de classificação têm sido empregadas baseadas na análise de grupos de solos, porém lidando com classes descontínuas (Webster, 1977). Desenvolvimentos recentes com classificação contínua e mapeamento parecem promissores no ordenamento de dados espaciais de solos (McBratney & Gruijter, 1992; Irvin et al., 1997; Lark, 1999).

Outros avanços como os estudos quantitativos da variabilidade dos solos baseados na teoria das variáveis regionalizadas e métodos geoestatísticos, têm sido discutidos e aplicados na ciência do solo para auxiliar na compreensão da dependência espacial das propriedades dos solo (Burgess & Webster, 1980; Vieira et al., 1981; Yost et al., 1982; McBratney & Webster, 1981; Reichardt et al., 1986; Cahn et al., 1994; Cambardella et al., 1994).

O solo é um material vivo, que se desenvolve na interface da atmosfera, biosfera, hidrosfera e geosfera (Jenny, 1980). Sendo assim, a superfície da terra, os sistemas hidrológicos de superfície, e as comunidades biológicas têm co-evoluído. Os sistemas são produtos de processos históricos comuns e funcionam de uma maneira integrada (Christophersen & Neal, 1990).

Uma integração de modelos descrevendo processos contínuos entre o sistema solo e o ambiente circunvizinho, ligando processos pedológicos, geomorfológicos, hidrológicos e ecológicos se faz necessária. Esta integração é essencial no entendimento de processos históricos, tais como a evolução da paisagem e a gênese dos solos, como também na predição e manejo de atributos do solo, em escala regional e local.

2.2 Em direção à modelagem quantitativa da diversidade dos solos

2.2.1 Estruturas de classificação

Todo modelo pedológico pode ser caracterizado com respeito ao grau computacional, complexidade e nível de organização. Estas três características são usadas como estrutura para classificar os tipos de modelos que têm sido desenvolvidos (Hoosbeek & Bryant, 1992). A primeira característica, grau de computação aplicada no modelo, distingue os modelos entre qualitativos e quantitativos (Fig. 1)

Qualitativo	Quantitativo
Mental/Verbal	Matemático
Descritivo	Determinístico/Estocástico

Grau de computação

Figura 1. Classificação baseada no grau de computação. Fonte: Hoosbeek & Bryant (1992).

Modelos mentais e verbais são descritivos e qualitativos. Modelos matemáticos expressam abstrações, na forma de algoritmos, usando tanto a abordagem determinística quanto estocástica. Modelos determinísticos presumem que um sistema simulado terá ao final apenas um resultado definido para uma entrada de dados. Já a resultante de um modelo estocástico não é uma solução determinada, mas sim uma distribuição ao redor da média. O modelo estocástico pressupõe que o resultado seja incerto e, portanto, usa a estrutura de simulação para levar a incerteza em conta (Addiscott & Wagenet, 1985). Na verdade, muitos modelos que têm sido desenvolvidos se enquadram em alguma posição intermediária entre esses dois extremos.

A segunda característica, complexidade da estrutura usada no modelo, faz distinção entre modelos funcionais e mecanísticos. Modelos funcionais usam uma relação simplificada ou empírica entre dados observados e simulados. Modelos

mecanísticos incorporam mecanismos fundamentais dos processos envolvidos com grau de complexidade correspondente ao estado presente do conhecimento científico (Addiscott & Wagenet, 1985).

A terceira distinção é baseada na hierarquia organizacional, a qual descreve a que nível um modelo objetiva simular um sistema natural. A variabilidade espacial do sistema solo necessita ser investigada no nível de resolução apropriado à escala que o modelo objetiva simular o sistema. A variabilidade espacial dos solos forma um *continuum* desde o nível de resolução megascópico ao microscópico (Wilding, 1985).

Os modelos qualitativos serviram bem ao propósito dos levantamentos de solos para descrever a distribuição dos solos na paisagem, e continuam tendo seu papel no cumprimento deste propósito. O desenvolvimento de modelos quantitativos contribuirá para o entendimento da gênese dos solos e em áreas onde os levantamentos de solos não estão completos (Hoosbeek & Bryant, 1992). Os pedólogos são desafiados a adotar ferramentas de simulação e modelagem e começam a árdua tarefa de colecionar dados para construir e testar modelos pedogenéticos quantitativos (Hoosbeek & Bryant, 1992).

2.2.2 Modelos de organização do *continuum solo-paisagem*

Os levantamentos de solos convencionais são baseados num modelo de organização do *continuum solo-paisagem* que pressupõe a dominância de blocos de solos similares com variação brusca ocorrendo nos limites (Burrough, 1993). Estudos da variabilidade dos solos têm gerado outros modelos de estrutura espacial. Uma variedade de modelos espaciais conceituais pode ser ilustrada plotando uma variável hipotética (atributo) z contra uma variável espacial x (Burrough et al., 1994) (Fig. 2). Este modelo conceitual ilustra abrupta, contínua ou irregular (*noisy*) variação no espaço.

A Fig. 2a mostra o modelo *convencional* o qual é também chamado de modelo discreto, ou mapa de polígono. O solo muda abruptamente nos limites mapeados e é relativamente homogêneo dentro da classe. Pressupõe-se que ocorram fortes correlações entre as propriedades dos solos, além de sensíveis expressões dos limites da vizinhança; tais como mudanças de vegetação, formas de relevo e padrões de imagens de

sensoriamento remoto. A Fig. 2b apresenta um modelo contínuo, baseado na suposição de variabilidade espacial gradual, a qual pode ser modelada como uma superfície matemática.

Na realidade, modelos menos extremos de variabilidade são frequentemente mais apropriados. Modificações dos modelos discretos e contínuos permitem algum “ruído” ou pequenas oscilações de variações dentro das divisões geográficas discretas (Fig. 2c) ou dentro da paisagem variando continuamente (Fig. 2d). Estas formas de variação podem estar todas presentes em uma única área (Fig. 2e), onde: - variações não estacionárias geram uma tendência, mudanças abruptas em atributos particulares podem estar presentes, e as variações dentro da unidade podem ser grandes. Em alguns casos, predominam as variações em curta distancia (Fig. 2f) e nenhum modelo ordenado é apropriado. Onde nenhuma ordem geográfica pode ser decifrada, o mapeamento não é útil. (Burrough et al., 1994).

Figura 2. Modelos de distribuição dos solos no espaço geográfico
Fonte: Burrough (1993).

2.3 Indivíduos, entidades e corpos de solos

A despeito da ênfase em rigidamente definidas entidades na classificação e levantamentos dos solos, os cientistas de solos tem frequentemente referido-se a seus objetos de estudo como um *continuum* (Simonson & Gardner, 1960; Knox, 1965; Davies & Gamm, 1970). Considerável desacordo existe com relação ao objeto solo como indivíduo. A literatura debate se o papel da classificação é o de agregar indivíduos ou de dividir um *continuum* (Simonson, 1968). Na prática, entretanto, a classificação de solos não lida com indivíduos, nem com segmentos do *continuum*, mas com dados derivados de amostragem. No desenvolvimento de uma classificação, as classes podem ser construídas com base no conceito modal, mas são muitas vezes definidas em termos de critérios limitados (Cline, 1949).

A busca do indivíduo solo está relacionada ao desejo de conciliar unidades taxonômicas e de mapeamento, e à necessidade de estabelecer-se um denominador comum para a comunicação e correlação com outros sistemas. Um indivíduo ideal seria, de acordo com Johnson (1963):

- observável, mensurável e completo,
- delimitado por claros limites naturais,
- de conveniente tamanho para estudo,
- precisamente definido.

Como o solo geralmente não é um universo particular, nenhum indivíduo solo *natural* satisfatório, deste tipo, é reconhecido (Knox, 1965; Schelling, 1970). Como uma alternativa, indivíduos artificiais têm sido propostos (Knox, 1965). Indivíduos artificiais são construções conceituais, vindas do universo contínuo, criadas arbitrariamente e por conveniência (Knox, 1965).

Se os indivíduos não são facilmente reconhecidos, corpos de solos (*soil body*), podem ser considerados. Corpos de solos são divisões do *continuum*, os quais não precisam necessariamente preencher o critério de indivisibilidade, necessário para indivíduos. Para um *corpo de solo* ser considerado um *indivíduo solo*, ele deve ser

completo em si mesmo e também incluir toda a sequência vertical de horizontes do solo (Knox, 1965).

Várias outras entidades têm sido propostas. A *tessera* (Jenny, 1980) é um prisma vertical, tri-dimensional, ou cilíndrico de solo. A *tessera* é geralmente considerada como uma unidade operacional, a qual é examinada, descrita e amostrada no campo. *Tesserae* são, portanto, corpos artificiais similares em conceito aos “perfis de solos tomados como corpos” (Knox, 1965) e similares aos *pedons*, embora frequentemente menores do que estes. Na prática, os pedólogos e cartógrafos lidam principalmente com dados oriundos de amostras representativas de perfis ou tessera. Apesar das muitas discussões relativas à *objetos, entidades e corpos* no universo solo, a maior parte destas construções não são realmente utilizadas. Webster (1968) comentou que neste sentido, o *pedon* é irrelevante na Soil Taxonomy.

Os horizontes podem ser examinados localmente, na face dos perfis, onde eles são tradicionalmente considerados como sub-unidades do perfil ou pedon, mas podem também servir como unidades geográficas dentro da paisagem (FitzPatrick, 1980).

Huggett (1975) descreveu *solo-paisagem* como um sistema aberto tri-dimensional, no qual os limites são definidos como: - divisões de drenagem, superfície da terra, e o *front* de intemperismo na base do perfil do solo.

2.4 Relações solo-paisagem e modelagem

2.4.1 Perspectiva histórica

A pedologia se desenvolveu do conceito revolucionário do solo como um corpo natural organizado e independente (Cline, 1961) que evoluiu da concepção nascida na Rússia, na década de 1870 (desenvolvida por Dokuchaev e outros), do solo como material alterado do substrato geológico e variando de acordo com influências do ambiente.

A formalização por Jenny (1941) dos fatores de formação do solo e a incorporação do relevo como um dos fatores, promoveu uma interligação entre geomorfologia e pedologia.

Na década de 1950, emergiu uma estrutura sistemática para investigação das relações solo-paisagem (Ruhe, 1956) que influenciou fortemente muitos estudos subsequentes e melhorou o conhecimento qualitativo do solo, das feições de relevo e relações estratigráficas (Wambeke, 1962; Walker, 1966; Ruhe, 1975; Daniels & Gamble, 1978; Lepsch et al., 1977, Vidal Torrado, 1989; Sá, 1995). Este tipo de abordagem estabeleceu prioridade na emergência de ferramentas e técnicas para análises espaciais mais sofisticadas.

2.4.2 Modelos de solo-paisagem

Os modelos de solo-paisagem descrevem o padrão natural dos solos e sua relação com outros elementos e processos da paisagem. Desta forma formalizam as relações entre solos, relevo e hidrologia, resultantes de correntes comuns de gênese. A modelagem do *solo-paisagem* é baseada na predizibilidade hipotética das relações entre componentes e da presença de variações sistemáticas na paisagem (Hall & Olson, 1991).

Para estabelecer correlações entre os componentes do *solo-paisagem*, os mesmos devem ser definidos e reconhecidos. Tradicionalmente, correlações entre solos e unidades do relevo (*landform*) têm sido estudadas usando-se pontos e dados de transectos, ou generalizações tais como unidades de mapeamento de solo e subdivisões geomórficas da paisagem (McSweeney et al., 1994).

Milne (1935) reconheceu as relações entre variações dos atributos do solo e a posição na paisagem e estabeleceu o conceito de catena, o qual, simplificada e pode ser definido como uma sequência adjacente de solos diferenciados ao longo de uma vertente (Retallack, 1992).

Ruhe & Walker (1968) propuseram um modelo de cinco segmentos para dividir as vertentes em unidades geomórficas e correlaciona-las com as propriedades dos solos.

Um modelo mais complexo, de divisão da catena em nove unidades geomórficas (estendendo-se do centro do interflúvio até o fundo do vale e da base do solo até a interface solo-atmosfera) foi desenvolvido por Conacher & Dalrymple (1977).

Vários estudos de solo-paisagem procuraram relacionar a forma da vertente (concavidade, convexidade, curvaturas planas e de perfil), além da declividade, com atributos do solo (Troeh, 1964; Huggett, 1975). Pennock et al., (1987) definiram elementos topográficos pela combinação da declividade, das curvaturas planas e de perfil e relacionou-os com o conteúdo de água do solo.

2.4.3 Uma nova estrutura espacial para modelar a diversidade dos solos

A hipótese básica de uma nova estrutura para modelagem dos solos é que modelos realísticos do continuum solo-paisagem no tempo e espaço possam ser sintetizados pela união de modelos hidrológicos de superfície e geomorfométricos (Moore et al., 1991) e integração da estratigrafia tridimensional dos materiais da superfície da terra (McSweeney et al., 1994; Slater, 1994; Irvin et al., 1997).

Três princípios gerais governam o modelo (Kirkby, 1985):

- Coleta racional de dados para definir a escala e estrutura da diversidade local. Preferencialmente ao uso de unidades ou indivíduos, a abordagem admite que os dados sejam derivados de amostras que possam ser flexivelmente arranjadas e classificadas;
- Estrutura flexível de dados para estocagem, análise e integração de informações. A estrutura de dados requerida deve incorporar a realidade da continuidade e variação 3-D do manto de solo.
- Modelos que relacionem os componentes do sistema. Os componentes da paisagem devem ser correlacionados para auxiliar no desenvolvimento de modelos de interpolação entre locais de amostragem, como também para prever a distribuição de atributos desejados a partir de dados associados. A estimativa de erro e validação do modelo devem ser integradas.

2.5 Predição de propriedades dos solos a partir de modelos contínuos da relação solo-paisagem

O solo e o relevo são fenômenos contínuos e embora limites possam ser frequentemente reconhecidos e usados com bom efeito, eles são essencialmente artificiais. É provável que as relações mais frutíferas para estimar-se propriedades do solo sejam funções contínuas dos atributos do relevo (Lark, 1999). Diferentes modelos têm sido propostos que resumam as relações entre as condições do solo e a topografia.

Os modelos mais antigos eram descontínuos, baseados na estratificação da paisagem em unidades tais como feições do relevo. Estes fornecem uma estrutura de amostragem e valores médios das propriedades do solo para cada uma das feições do relevo, que são então usados em predições, geralmente em escalas cartográficas pequenas.

Mais recentemente, vários modelos contínuos da relação solo–relevo foram desenvolvidos, nos quais assume-se que as condições do solo mudem continuamente com as propriedades topográficas. Estes modelos oscilam entre os que possuem um componente mecanístico significativo (Moore et al., 1993a) para os puramente empíricos e estatísticos (Odeh et al., 1994).

2.5.1 Modelo de Elevação Digital (DEM).

Métodos modernos tais como levantamentos de campo realizados com GPS, análises automatizadas de fotografias aéreas e sensoriamento remoto permitem gerar rapidamente modelos de elevação digital (DEMs), com muito boa resolução espacial.

DEM é um caso especial de uma superfície contínua, interpolada, que tem muito uso em GIS. As medidas de altitude, que também podem ser obtidas com uso de teodolitos, são interpoladas usando-se diversos tipos de interpoladores (por exemplo spline ou kriging) contidos em programas de sistemas de informação geográfica (GIS), gerando representações tridimensionais da paisagem. Os programas GIS permitem sobrepor informações temáticas, tais como, por exemplo, mapas de isolinhas de

atributos dos solos aos DEMs permitindo melhor visualização da ocorrência de alterações de características do solo na paisagem.

2.5.2 Atributos Topográficos

Algoritmos têm sido desenvolvidos para estimar-se atributos topográficos primários e secundários (Moore et al., 1993b) a partir de DEMs usando-se análises espaciais de programas GIS, baseadas em estrutura *raster*, ou celular. Os atributos topográficos são importantes nos estudos hidrológicos e de solos, e vários deles encontram-se listados e definidos em uma tabela no trabalho de Moore et al. (1993a). Moore et al. (1991) apresentou uma revisão sobre as relações entre atributos topográficos e processos hidrológicos e erosivos da paisagem.

Na década passada esta abordagem foi utilizada em vários trabalhos, na busca de modelos contínuos de predição das propriedades do solo, partindo-se da premissa de que as condições de atributos-chave dos solos mudem continuamente com as propriedades topográficas (Moore et al., 1993; Odeh et al., 1994; Bruin & Stein, 1998; Lark, 1999; McKenzie & Ryan, 1999).

Dentre os vários atributos primários e secundários do relevo, alguns têm se destacado e parecem ser particularmente poderosos e úteis no manejo das culturas e predição espacial de atributos do solo (Skidmore, 1989; Burrough & MacDonnell, 1998; Lark, 1999):

- Declividade (*slope*). Medida em graus, é definida pelo plano tangente à superfície, em cada nó do DEM, sendo a taxa máxima de mudança de altitude;
- Exposição solar (*aspect*). É a direção do compasso desta taxa máxima de mudança de altitude (medido em graus, a partir do norte, no sentido horário). Reflete a irradiância solar e a evapotranspiração em uma localidade específica;
- Curvatura de perfil (*profile curvature*). Curvaturas são taxas de mudança de declive (medidas em graus por unidade de distância). A curvatura de perfil é

a taxa de mudança do declive no sentido vertical, a partir de cada nó do DEM. Valores positivos indicam superfície côncava e valores negativos correspondem a superfícies locais convexas;

- Curvatura plana (*plan curvature, contour curvature*). Esta é a curvatura da superfície em cada nó, no plano horizontal. Valores negativos indicam convexidade neste plano e portanto divergência no fluxo de água de superfície;
- Índice de umidade (wetness index). É a medida do potencial de umidade do solo em um dado ponto.

No trabalho de Lark (1999) as formas dominantes de relevo identificadas com o uso da classificação contínua e dos atributos topográficos derivados do DEM foram correlacionadas com as duas principais formações litológicas. As propriedades físicas estudadas (distribuição do tamanho das partículas e conteúdo de água dos solos) mostraram significativa relação linear com as classes contínuas derivadas das propriedades topográficas. As propriedades químicas estudadas (conteúdo de matéria orgânica, pH e nutrientes) não mostraram tal relação. O método desenvolvido nesse trabalho foi aplicado em escala de campo (à nível de propriedade) e foi iniciado devido a necessidade de desenvolver-se estratégias de menor custo para mapear a variabilidade do solo nesta escala. A utilidade desta abordagem no manejo ao nível de campo dependerá, segundo o autor: 1) da possibilidade de gerar-se dados de elevação digital à custo razoável; 2) da extensão na qual as variações de atributos chave dos solos, na escala de campo, estejam relacionadas com a topografia.

A disponibilidade de informação topográfica nesta escala provavelmente não limitará a utilização do método. Sistemas de Posicionamento Global (GPS) podem ser usados para coletar estas informações ao mesmo tempo que os mapas de rendimento são produzidos, quando adotadas práticas da agricultura de precisão. Isto tornará mais fácil a integração do DEM com informações derivadas de regressões com os dados de rendimento.

Ainda não é claro quais sejam as variáveis do solo mais importantes no manejo na escala de campo, mas é provável que sejam necessárias informações de uma gama de propriedades. Portanto, o uso de DEMs, enquanto potencialmente úteis, não invalidam a utilidade de sensores para medidas intensivas de baixo custo de propriedades químicas do solo (Viscarra Rossel & McBratney, 1997).

2.6 Uso da classificação contínua em pedologia.

Embora limites possam ser reconhecidos e frequentemente usados com bom efeito em estudos de solos e geomorfologia, sendo o solo e o relevo fenômenos contínuos, as divisões são meros artifícios. Segundo Lark (1999) a classificação contínua parece idealmente ajustada para extrair variáveis preditoras a partir de DEMs.

Classificação contínua é um termo usado por McBratney & Gruijter (1992) para o agrupamento de dados usando a técnica *fuzzy k-means*. O método de classificação contínua utiliza o conceito de grupos *fuzzy* (Zadeh, 1965), que são uma forma matemática de lidar com a ambiguidade, a incerteza e a continuidade que caracterizam os fenômenos naturais. Os membros dos grupos *fuzzy* não compartilham limites exclusivos. É permitido a um indivíduo participação simultânea no universo de classes definidas para o grupo de dados. Portanto, cada indivíduo (seja ele perfil de solo, horizontes, atributos de solos ou do relevo, entre outros) pode ser descrito pelo grau de participação numa série de classes (Odeh et al., 1992).

Ao contrário da classificação tradicional, onde os indivíduos podem ser membros de apenas uma classe, a aplicação da teoria dos agrupamentos *fuzzy* permite aos indivíduos ter participação total, parcial ou nenhuma participação em cada uma das diferentes classes (Slater, 1994). A taxa de participação varia de 0,0 (nenhuma participação na classe) a 1,0 (inteiramente e somente membro de uma classe); o somatório dos valores de participação nas classes de qualquer indivíduo é igual a 1,0 (Irvin et al., 1997). O grau de participação como membro da classe indica o quanto o indivíduo é similar ao centróide de cada classe. Os indivíduos com elevado grau de participação em apenas uma classe são muito similares ao centróide da classe, enquanto

aqueles que são membros parciais de várias classes se enquadram como intermediários dentro do contínuo (Slater, 1994).

O uso das classes *fuzzy* é apropriado onde a variação espacial é gradual ao invés de abrupta e tem sido aplicado para descrever fenômenos naturais contínuos na paisagem, tais como atributos de solos (McBratney & Gruijter, 1992; Odeh et al., 1992; Slater, 1994; Irvin et al., 1997). A base matemática do agrupamento fuzzy k-means e os algoritmos computacionais para análise dos dados foram detalhados em várias publicações (Burrough, 1989; McBratney & Gruijter, 1992; Odeh et al., 1992a).

Este procedimento estabelece um conjunto de k classes entre N objetos (por exemplo, localidades de um DEM), onde qualquer objeto i é caracterizado por um vetor, x_i , o qual contém medidas de v variáveis (por exemplo, $v = 3$, a saber: declividade, exposição solar e altitude relativa). As classes são grupos de objetos semelhantes entre si, com respeito às variáveis v . As classes são contínuas, ou “fuzzy”, no sentido que um objeto i não está simplesmente localizado em uma classe, j , e, portanto, fora de todas as outras (como na classificação *crisp* ou booleana), mas ao contrário tem uma participação finita em cada uma das k classes (Lark, 1999). μ_{ij} é o grau de participação do objeto i na classe j , e está sujeito a duas restrições:

$$\sum_{j=1}^k \mu_{ij} = 1, \quad (1)$$

$$0 \leq \mu_{ij} \leq 1, \quad (2)$$

Se $\mu_{ij} = 0$, então i não se assemelha de nenhuma forma a classe j ;

Se $\mu_{ij} = 1$, significa semelhança exclusiva do objeto i na classe j ;

Se $0 < \mu_{ij} < 1$, então i tolera parcial semelhança na classe j , como também em pelo menos uma das outras classes.

A classificação contínua é obtida achando-se valores de participação (*membership*), μ_{ij} , $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, k$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k d_{ij}^2 (\mu_{ij})^m \quad (3)$$

onde m é um “*fuzziness exponent*” com valor $1 < m \leq 2$; d_{ij} é uma norma; uma medida da distância entre o objeto i e o centro da classe j no espaço dimensional v definido pelas variáveis medidas. O centro da classe j é um vetor, c_j , dos valores das propriedades v nas quais as classes são definidas e representam o membro típico da classe j (centróide da classe).

A classificação contínua pode ser obtida usando várias normas. A medida métrica (*distance*) *Euclidean* é apropriada se as variáveis v não são correlacionadas dentro das classes (variáveis independentes). A *Mahalanobis distance* é preferida quando as variáveis mostram correlações que são mais ou menos homogêneas nas classes (dependência entre as variáveis).

O expoente *fuzziness* (m , na equação 3) controla o grau de *fuzziness* (descontinuidade, incerteza, ambiguidade) da classificação. A escolha do expoente “ m ” é um pouco subjetiva (Odeh et al., 1992) e a experimentação pode ser desejada para guiar a escolha do parâmetro *fuzziness*. Onde o expoente é 1, a classificação não produz sobreposição de classes, resultando em classes rígidas. O aumento dos valores causa mais *fuzziness* (representando maior continuidade). A maior parte dos estudos de classificação tem usado valores entre 1,1 e 1,5.

A análise fuzzy k-means permite *intergrades* entre as classes, portanto, os pontos que ficam intermediários entre os centróides das classes têm graus de participação em várias classes. McBratney & Gruijter (1992) as chamaram de *intragrades*. No entanto, alguns pontos podem ficar fora do universo descrito pelas classes; estes indivíduos podem ter participação igual nas classes e serem pobremente representados em qualquer classe. Para acomodar estes *extragrades* McBratney & Gruijter (1992) definiram uma outra função que permite uma classe de *outlier* com membros espalhados fora das classes definidas no grupamento dos atributos.

O uso da classificação contínua ou *fuzzy* tem sido explorada em levantamentos e classificação de solos (McBratney & Gruijter, 1992; Burrough et al., 1997; Irvin et al., 1997) e no mapeamento e classificação de indicadores-chave da fertilidade do solo (Dobermann & Oberthur, 1997; Gruijter et al., 1997; Lagacherie et al., 1997; Freissinet

et al., 1998; Lark, 1999). Uma revisão sobre várias possibilidades de aplicação na ciência do solo, que podem ser geradas ou adaptadas a partir da lógica e teoria de agrupamentos *fuzzy* pode ser encontrada no trabalho de McBratney & Odeh (1997).

2.7 Geoestatística

Métodos geoestatísticos, baseados na teoria das variáveis regionalizadas, têm sido aplicados na ciência do solo para auxiliar na compreensão da dependência espacial das propriedades do solo e fornecer um método ótimo de estimativa destas propriedades em localidades não amostradas. A variabilidade espacial pode ser descrita através do semivariograma. Quando evidente, a dependência espacial pode ser modelada e usada num processo conhecido como krigagem, para estimar valores em localidades não amostradas (Jeffrey, 1993). O desenvolvimento detalhado desta teoria pode ser encontrado em Burgess & Webster (1980), Vieira (1983) e Goovaerts (1997).

O número de pares de dados disponíveis usados para obter-se os semivariogramas não deve ser muito pequeno, para evitar-se mudanças abruptas no semivariograma para pequenas diferenças de distância (Entz & Chang, 1991). No entanto o custo de amostragem aumenta exponencialmente com a redução da distância do gride. A seleção de um apropriado protocolo de amostragem é dificultado pelo fato da comunidade científica não ter alcançado um consenso quanto a forma de coleta das amostras. Em Entz & Chang (1991) encontram-se citações de vários trabalhos sobre metodologia de amostragem dentro desta abordagem.

2.8 Agricultura de Precisão

Os conceitos básicos do gerenciamento localizado das atividades agrícolas, que constituem a base da Agricultura de Precisão (AP), foram apresentados pela primeira vez em 1929 por Linsley e Bauer (Goering, 1993) quando realizaram os primeiros estudos relacionados com a aplicação localizada de insumos, mais especificamente de calcário. Devido à inexistência de tecnologia adequada, estes conhecimentos foram

colocados em prática apenas em pequenas áreas e por curto espaço de tempo, uma vez que eram executados manualmente. Com o surgimento de novas tecnologias, capazes de automatizar as tarefas de sensoriamento, aplicação localizada de insumos e medidas pontuais de produtividade, estes conceitos foram retomados dando surgimento à agricultura de precisão.

Adventos tecnológicos tais como sensoriamento remoto, sistema de posicionamento global (GPS) e tratamento em taxas variáveis permitem amostragem georreferenciada e aplicação localizada de insumos. Por outro lado, o uso de sistemas de informação geográfica (GIS) é essencial na operação de bancos de dados e informações que possuem componentes espaciais, funcionando com ferramenta chave na integração e análise dos dados da AP (Usery et al., 1995).

A agricultura de precisão ou gerenciamento localizado da produção agrícola é um conceito que vem evoluindo nas últimas duas décadas e que tem por princípio o manejo localizado das práticas agrícolas à nível de campo, ou seja, em escala em torno de 1:6.000 ou maior. Reconhece o solo como um meio heterogêneo, com propriedades físicas, químicas e biológicas que podem variar espacial e temporalmente dentro do campo, de uma maneira irregular (Trangmar et al., 1986).

Na atividade agrícola cresce cada vez mais o conflito entre a economia e a ecologia. A utilização de dosagens elevadas de fertilizantes tem causado graves problemas ambientais. Para minimizar tais agressões e aumentar o retorno econômico, Auernhammer et al., (1994) propuseram a realização de balanços entre o fornecimento e a utilização dos fertilizantes pelas culturas, a fim de evitar-se as superdosagens. O aperfeiçoamento desta técnica pode ser obtido se as reais necessidades de insumos forem medidas e aplicadas de forma localizada.

Uma das principais preocupações em relação à análise da variabilidade dos solos, diz respeito à separação das glebas em zonas de solos relativamente homogêneos, de tamanho e forma apropriados para a aplicação de manejo diferenciado (Holzey, 1993). Preferencialmente, as informações sobre as zonas de manejo devem englobar as principais características que influenciam o crescimento das plantas (Thompson & Robert, 1995).

Uma série de fatores devem ser satisfeitos para que haja sucesso na aplicação do manejo localizado. Dentre eles estão incluídos: 1) o sistema adequado de coleta dos dados, 2) a análise e interpretação eficientes da variabilidade espacial dos dados, 3) o conhecimento da resposta do sistema solo-planta às mudanças de manejo e, 4) a evidência de que o manejo espacial das variáveis será mais rentável do que a abordagem tradicional (Moore & Tyndale-Biscoe, 1999).

3 PREDIÇÃO DE ATRIBUTOS DE SOLOS ATRAVÉS DE ANÁLISES TOPOGRÁFICAS EM TOPOSSEQUÊNCIAS DA REGIÃO DOS “CAMPOS GERAIS”/PR

3.1 RESUMO

Uma combinação de ferramentas relativamente recentes foi usada para identificar e caracterizar a variabilidade espacial de atributos do solo com o objetivo de gerar zonas de manejo de fertilizantes. Foram selecionadas quatro topossequências representativas da região dos “Campos Gerais”-PR de acordo com o material de origem dos solos e do tempo de adoção do sistema Plantio Direto (PD) no município de Tibagi (50° 20’ W; 24 ° 26’ S). As áreas escolhidas compreendem um campo nativo e três áreas adjacentes cultivadas no sistema PD nos últimos 10 e 20 anos. Os solos foram amostrados em grades de 50,0 m de espaçamento nas profundidades 0-0,10; 0,10-0,20 m. Os dados utilizados na análise incluíram: altitude, pH, MO, Ca, Mg, K trocáveis, P, CTC, densidade do solo, argila, silte, areia e rendimento do trigo. A análise de regressão linear múltipla foi utilizada para explorar as relações entre os atributos topográficos derivados dos modelos de elevação digital e atributos dos solos. Relações significativas foram encontradas entre os atributos topográficos estudados e alguns indicadores chave da fertilidade dos solos, tais como MO, CTC, conteúdo de argila e densidade do solo. A técnica “Fuzzy k-means” foi usada para agrupar valores de atributos de solos e topográficos. Os resultados revelaram a possibilidade de definir zonas de fertilidade dos solos nas topossequências estudadas.

3.2 SUMMARY: SOIL ATTRIBUTE PREDICTION USING TERRAIN ANALYSIS IN “CAMPOS GERAIS”/PR OXISOLS

A combination of relatively recent tools was used to identify processes contributing to soil spatial variability and to create fertilizer management zones. Four representative toposequences of the “Campos Gerais” region were selected according to parent material and no-tillage management period in the Santa Branca farm (50° 20' W; 24 ° 26' S), southern of Brazil. Chosen areas consisted of an undisturbed native field and three adjacent sites cultivated under no-tillage system for the past 10 and 20 years. Surface soil samples of the 0-0,10; 0,10-0,20 m depths were sampled in a 50,0 m grid. Data used in this analysis included: altitude, pH, OM, Ca, Mg, P, K soil tests, soil bulk density, clay, silt and sand contents and wheat yield. Multiple linear regression analysis was performed to explore the relationship between topographic attributes derived from digital elevation model and soil attributes. Significant relationships were found between terrain attributes and some key indicators of soil fertility such as OM, CEC, clay and bulk density. The fuzzy k-means technique was used as a method of grouping selected soil and terrain attributes. The results defined useful clusters of soil potential fertility.

3.3 INTRODUÇÃO

Os atributos utilizados no levantamento de solos incluem propriedades relacionadas com a qualidade das terras (Holzhey, 1993) e têm sido largamente utilizados para auxiliar na determinação da aptidão dos solos para uma variedade de usos (Kuilenburg et al., 1982). No entanto, o resultado das análises de solo, ao menos nas camadas superficiais, mostram grande variabilidade dentro das unidades de mapeamento. Nas últimas duas décadas tem crescido o questionamento quanto a adequação destas unidades para fornecer informações para o manejo de práticas agrícolas na escala de campo, levantando-se este novo paradigma na agricultura dos tempos atuais.

Altas produtividades agrícolas alcançadas atualmente dependem da habilidade de identificar-se os atributos do solo que limitam o crescimento das plantas (Nielsen et al., 1995). Com respeito ao manejo localizado da produção agrícola, a preocupação fundamental em relação a análise da variabilidade dos solos diz respeito à separação das glebas em zonas de solo relativamente homogêneo, de tamanho e forma apropriados para a aplicação de manejo diferenciado (Holzhey, 1993). Alguns dos componentes mais críticos do gerenciamento localizado, também chamado de Agricultura de Precisão (AP) são a escolha da estratégia para gerar o mapa de manejo diferenciado (Thompson & Robert, 1995) e o custo para obtenção da informação adequada sobre as propriedades dos solos na escala apropriada (McBratney & Pringle, 1997). Neste sentido, uma linha que vem sendo explorada é o desenvolvimento de métodos de predição das propriedades do solo que façam o melhor uso de informações pré-existent, particularmente aquelas de baixo custo de obtenção. Uma destas fontes de informação é a topografia (Lark, 1999). Particularmente, desde o trabalho de Jenny (1941), é um axioma na ciência do solo que a topografia seja um importante fator no desenvolvimento dos solos.

Irvin et al. (1997) usou atributos topográficos derivados de modelos de elevação digital (DEMs) para identificar quantitativamente os elementos geomórficos da paisagem como alternativa para o delineamento manual destes elementos. Duas técnicas foram comparadas neste estudo: uma classificação não supervisionada (isodata) e uma classificação contínua, ou “fuzzy”. Isodata é um método estatístico de agrupamento no qual cada ponto de amostragem é enquadrado em uma classe em particular, enquanto na classificação contínua, ou “fuzzy”, cada variável pode ser membro parcial de várias classes.

A classificação contínua é um termo usado por McBratney & Gruijter (1992) para o agrupamento de dados com o uso da técnica “fuzzy k-means”. O método da classificação contínua utiliza os conceitos dos grupamentos “fuzzy” (Zadeh, 1965). Diferentemente da classificação tradicional, onde os indivíduos podem ser membros de apenas uma classe, a aplicação da teoria dos grupamentos “fuzzy” permite aos indivíduos ter participação total, parcial ou nenhuma participação em cada uma das

diferentes classes (Slater, 1994). A taxa de participação varia de 0,0 (nenhuma participação na classe) e 1,0 (inteiramente e somente membro de uma classe); o somatório dos valores de participação nas classes de qualquer indivíduo é igual a 1,0 (Irvin et al., 1997). O grau de participação como membro da classe indica o quanto o indivíduo é similar ao centróide de cada classe. Os indivíduos com elevado grau de participação em apenas uma classe são muito similares ao centróide da classe, enquanto aqueles que são membros parciais de várias classes se enquadram como intermediários dentro do contínuo (Slater, 1994). O uso das classes “fuzzy” é apropriado onde a variação espacial é gradual ao invés de abrupta e tem sido aplicada para descrever fenômenos naturais contínuos na paisagem, tais como atributos de solos (McBratney & Gruijter, 1992; Odeh et al., 1992; Slater, 1994; Irvin et al., 1997).

DEM é um caso especial de uma superfície contínua, interpolada, obtida através de dados de altitude, que tem muito uso em GIS. Por outro lado, algoritmos têm sido desenvolvidos para estimar-se atributos topográficos primários e secundários a partir de DEMs (Moore et al., 1993b) usando-se análises espaciais de programas GIS, baseadas em estrutura raster, ou celular. Dikau (1989) demonstrou como a análise digital topográfica pode ser aplicada para quantificar feições do relevo e definir unidades topográficas para mapeamentos geomorfológicos e pedológicos.

Moore et al. (1991) apresentou uma revisão sobre as relações entre atributos topográficos e processos hidrológicos e erosivos na paisagem. Segundo estes autores, estes índices derivados topograficamente parecem ser particularmente poderosos e úteis no manejo das culturas e predição espacial de atributos do solo. Também foram empregados na estratificação de medidas e compartimentação da variabilidade espacial em micro e meso-escala (Hairston & Grigal, 1991; Odeh et al., 1991).

Atributos topográficos podem ser divididos em primários e secundários (ou compostos). Os atributos primários são calculados diretamente dos dados de elevação e incluem variáveis tais como declividade (*slope*), exposição solar (*aspect*), área de captação específica (*specific catchment area*), comprimento máximo de fluxo (*maximum flow path length*), curvatura de perfil (*profile curvature*) e curvatura plana (*plan curvature*). Todos estes atributos são importantes nos estudos hidrológicos e de

solos, e encontram-se listados e definidos em uma tabela no trabalho de Moore et al. (1993a) ou em Burrough & McDonnell (1998). Os atributos secundários envolvem combinações de atributos primários e podem ser derivados por equações que descrevem a física básica destes processos.

Se assumirmos que a variabilidade espacial das propriedades do solo seja função da variabilidade espacial dos fatores formadores do solo e antropogênicos, necessitamos de meios para descrever e explicar a variabilidade espacial destes fatores. No presente estudo, a topografia, o material de origem e o manejo das culturas são os fatores de maior variabilidade, e, supostamente, os fatores primários que estão contribuindo para a variabilidade dos solos.

Este trabalho foi realizado como um passo inicial na identificação dos processos contribuintes na variabilidade espacial de solos com diferenças de material de origem e tempo de adoção do sistema PD, na região dos “Campos Gerais”, centro-sul do Paraná. Os objetivos específicos desta pesquisa foram: 1) avaliar as alterações nos atributos do solo com o tempo de cultivo no sistema PD; 2) definir relações estatísticas entre atributos do relevo e atributos dos solos e 3) verificar o potencial do método de classificação contínua ou “fuzzy” como uma ferramenta para gerar zonas de manejo da fertilidade do solo.

3.4 Material e Métodos

3.4.1 Caracterização Geral da Área

O estudo foi realizado na fazenda Santa Branca (50° 23' W; 24° 36' S) e na fazenda Pousada dos Gaúchos (50° 20' W; 24° 26' S) localizadas nas proximidades da cidade de Tibagi, no Segundo Planalto do Estado do Paraná (Figura 1).

A topografia das áreas selecionadas para este estudo é constituída por longas vertentes de forma predominantemente convexa, de declive suave (0 - 6%) e altitude variando entre 790 e 910 metros. A vegetação é caracterizada como estepe subtropical de gramíneas baixas, representadas por algumas gramíneas resistentes ao fogo, tais

Figura 1. Localização da área de estudo

como: *Andropogon sp*, *Aristida sp*, *Paspalum sp*, *Panicum sp*., ervas semi-arbustivas e arbustos isolados ou em grupos, entremeadas por florestas de galeria subtropical de Araucária. Segundo Maack, (1981) esta vegetação típica, denominada “Campos Gerais”, é provavelmente um relict do clima árido do Pleistoceno.

O material de origem é constituído por sedimentos clásticos do período devoniano, grupo Paraná, (folhelho da formação Ponta Grossa e arenito da formação Furnas) e material retrabalhado destas duas formações (Trein et al., 1966). O clima da região enquadra-se como subtropical úmido de altitude, tipo Cfb (classificação de Koeppen), de verões brandos e invernos com geadas frequentes. A precipitação pluviométrica anual é de 1532mm(IAPAR, 1998¹), com boa distribuição durante o ano. A temperatura média mensal é < 22° C durante o verão e < 18° C durante o inverno (Maack, 1981). Os solos foram classificados como Latossolos Vermelhos (*Typic Hapludox*), com perfis profundos, muito bem estruturados e drenados, apresentando variações texturais ao longo das vertentes.

¹ INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Área de Ecofisiologia, Londrina, 1998. Dados climáticos.

Foram selecionadas quatro topossequências de 10 ha (200 x 500 m), típicas da região: um campo nativo (CN) e três áreas adjacentes cultivadas em rotação de culturas por 10 (PD10FN, PD10PG) e 20 anos (PD20) no sistema PD. A escolha destas áreas baseou-se no material de origem e textura dos solos, no tipo de vertente e nas práticas culturais. Um resumo das práticas culturais pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1. Rotação de culturas e quantidade de fertilizantes aplicados nas áreas cultivadas a 10 anos (PD10PG e PD10FN) e 20 anos (PD20) no sistema PD[†]

Áreas [†]	Entradas	Rotação de Culturas [‡]	Fertilizantes		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
			-----Kg ha ⁻¹ -----		
PD10	Total	A/M/A/S/T/S	407	685	714
	Anual		40,7	68,5	71,4
PD20	Total	A/M/A/S/T/S	643	1.472	1.361
	Anual		32	74	68

[†] Referir-se à Tabela 2 (ou Tabela 15, do Anexo) para descrição das áreas;

[‡] A = Aveia (*Avena sativa*); M = Milho; T = Trigo; S = Soja

O esquema geral da metodologia utilizada está ilustrado na Figura 2. As seções seguintes descrevem os procedimentos específicos usados em cada estágio deste processo.

3.4.2 Modelo de Elevação Digital (DEM) e Atributos Topográficos

Os dados de altitude foram medidos com um teodolito em cada ponto das quatro grades de amostragem (Figura 2). As medidas de altitude foram interpoladas usando o interpolador “spline” para criar um DEM de grade regular de 5,0 m, constituído de 4.000 pontos, com o programa Arc View GIS 3.2 – Environmental Systems Research Institute (1999). Este método é apropriado para superfícies suaves tais como as vertentes da área de estudo. Em alguns pontos específicos da área, as coordenadas geográficas foram medidas com o uso de GPS.

Figura 2 Desenho esquemático da metodologia de modelagem solo-paisagem

Os atributos topográficos foram estimados dos DEMs usando-se análises espaciais do programa Arc View GIS. Uma descrição do método computacional de estimativa de atributos topográficos primários a partir do DEM encontra-se no trabalho de Moore et al. (1993b). Os atributos topográficos primários calculados neste trabalho foram declividade (DECL) e grau de exposição solar (EXP). Também foi calculado um atributo secundário simples que denominamos altitude relativa (AR), obtido pela diferença entre a altitude média e a altitude medida em cada ponto da grade de amostragem.

3.4.3 Metodologia de amostragem e análise de solo e plantas

As amostras de solos foram coletadas em cada nó da grade de 50 x 50 m ($n = 55$) em maio de 1998, depois da colheita do milho e antes da semeadura do trigo

(Figura 3). Foram adotadas duas profundidades de amostragem (0-0,10 e 0,10-0,20 m). As amostras foram obtidas cavando-se buracos de dimensão 0,20 x 0,20 m e retirando-se fatias de 0,020 m de espessura dos quatro lados, em cada profundidade, para obter-se duas amostras compostas em cada nó da grade . As amostras foram secas ao ar, passadas através de peneiras de 2,0 mm e estocadas para análises subsequentes. Foram coletadas amostras indeformadas nos mesmos lugares e às mesmas profundidades para as medidas de densidade do solo.

Foram abertas três trincheiras de 1,50 m de profundidade em cada área de estudo para a descrição morfológica (Lemos & Santos, 1996) e análises físicas, químicas e mineralógicas dos perfis (Figura 3). As posições da vertente foram descritas de acordo com a classificação de Ruhe (1975) (Figura 4).

Figura 3 Esquema de amostragem em grade e localização dos perfis de solo (P1, P2, P3).

Figura 4 Posições na vertente baseado no esquema de classificação de Ruhe (1975).

As medidas de rendimento da cultura do trigo foram obtidas através de colheita manual de seis linhas de trigo, numa seção de 4,0 m de comprimento, sempre imediatamente acima dos pontos de amostragem do solo. Mediu-se a umidade dos grãos de trigo em todos os locais de coleta ajustando-se o peso para 13% de umidade.

Foram efetuadas análises químicas nas frações de solo < 2 mm. O pH foi medido por potenciometria usando uma solução 1:2 de solo/0,01M CaCl₂. Al, Ca, Mg e K trocáveis e P foram extraídos usando-se resina trocadora de cátions/ânions (Raij et al., 1987). A acidez potencial foi determinada usando-se uma solução tamponada a pH 7,0, de acordo com Raij et al., 1987). O carbono foi determinado por combustão úmida (EMBRAPA, 1997). As frações areia, silte e argila foram separadas, após agitação horizontal de 16 horas, usando-se solução de hexa-metafosfato de sódio como dispersante químico, pelo método do hidrômetro (EMBRAPA, 1997). A densidade global foi determinada pelo método do cilindro volumétrico, descrito por Blake & Hartge (1986), utilizando-se cilindros com volume interno de cerca de 100 cm³. A difração de Raio-X foi medida por um difratômetro Philips tipo PW3710 BASED com tubo de cobre, de acordo com Jackson (1969).

3.4.4 Análises Estatísticas e Obtenção de Curvas de Isolinhas de Atributos do Solo

A afinidade entre os atributos do solo e topográficos foi avaliada através do coeficiente de correlação de Pearson usando-se o programa JMP, versão 3,0 para Windows (Statistical Discovery Software – SAS, 1997). A significância estatística foi analisada para $p < 0,05$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$ e representada por *, ** e ***, respectivamente. As isolinhas dos atributos do solo e rendimento do trigo foram estimadas com o uso de abordagem geoestatística descrita por Journel & Huijbregts (1978), baseada na teoria das variáveis regionalizadas. A krigagem foi usada como método de interpolação e mapas foram produzidos com o programa GS+ for Windows, versão 3.0 (Gamma Design Software, 1999).

3.4.5 Relações entre atributos dos solos e topográficos

A análise de regressão linear múltipla foi utilizada para explorar as relações entre atributos do solo e topográficos usando-se o programa JMP, versão 3,0 para Windows (Statistical Discovery Software – SAS, 1997). As equações de regressão foram usadas no programa Arc View GIS 3.2 – Environmental Systems Research Institute (1999) para estimar-se superfícies de atributos dos solos.

3.4.6 Classificação contínua ou fuzzy

A classificação contínua ou “fuzzy” foi usada como método para agrupar-se atributos do solo e topográficos usando-se a técnica “fuzzy k-means”. A base matemática desta técnica e os algoritmos computacionais usados para analisar os dados foram detalhados em várias publicações (Burrough, 1989; McBractney & Gruitjer, 1992; Odeh et al., 1992). O programa Fuzme, *Fuzzy k-Means with Extragrades* (Australian Center for Precision Agriculture, 1999) foi usado para realizar a classificação contínua. Foi selecionado *fuzzy k-means* como algoritmo, expoente *fuzziness* 1,3 e a medida métrica (de distância) Mahalanobis.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dados selecionados de análises morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas dos perfis de solos das quatro topossequências estão apresentados na Tabela 2, como também nas Tabelas 16, 17 e 18 do Anexo. A textura do solo está refletindo as diferenças do material de origem. As áreas de campo nativo e PD10PG, formadas sobre o folhelho Ponta Grossa apresentaram textura muito argilosa. A textura da área PD10FN, cujo material de origem é o arenito da formação Furnas, apresentou-se predominantemente franco argilo-arenosa, enquanto a área NT20, formada com material retrabalhado destas duas formações, apresentou teor intermediário de argila (argilo-arenosa).

Propriedades	Hor [†]	PD20 ^{††}		PD10FN ^{†††}			
		Topo	M.enc. *	Posição na vertente		M.enc. *	M.enc. *
			M.enc. *	M.enc. *	Topo	M.enc. *	M.enc. *
Profundidade, cm	Ap	0-20	0-16	0-17	0-17	0-19	0-18
	AB	-29	-25	-26	-30	-27	-29
	BA	-43	-39	-39	-47	-39	-40
	Bw1	-80	-76	-72	-83	-90	-92
	Bw2	-150+	-150+	-150+	-150+	-150+	-150+
Argila, g kg ⁻¹	Ap	48	38	42	32	24	22
	AB	48	38	42	38	28	24
	BA	50	42	44	42	30	32
	Bw1	54	46	50	46	34	32
	Bw2	54	46	50	46	38	32
Textura	Ap	Arg.Ar	Arg.Ar	Arg.Ar	Fr.Arg.Ar	Fr.Arg.Ar	Fr.Arg.Ar
	AB	Arg.Ar	Arg.Ar	Arg.Ar	Arg.Ar	Fr.Arg.Ar	Fr.Arg.Ar
	BA	Arg.Ar	Arg.Ar	Arg.Ar	Arg.Ar	Fr.Arg.Ar	Fr.Arg.Ar
	Bw1	Arg	Arg.Ar	Arg.Ar	Arg.Ar	Fr.Arg.Ar	Fr.Arg.Ar
	Bw2	Arg	Arg.Ar	Arg.Ar	Arg.Ar	Arg.Ar	Fr.Arg.Ar
Densidade do Solo, g cm ⁻³	Ap	1,35	1,33	1,45	1,55	1,67	1,72
	AB	1,25	1,42	1,33	1,44	1,66	1,61
	BA	1,26	1,38	1,26	1,40	1,62	1,53
	Bw1	1,14	1,33	1,30	1,30	1,48	1,58
	Bw2	1,16	1,22	1,25	1,39	1,41	1,56
pH (0.01M CaCl ₂)	Ap	4,8	5,3	4,6	4,8	5,5	5,3
	AB	4,2	4,1	4,1	4,6	4,8	4,2
	BA	4,2	4,2	4,2	4,0	4,2	4,1
	Bw1	4,5	4,2	4,2	4,4	4,4	4,2
	Bw2	4,6	4,5	4,4	4,3	4,8	4,2
Al Trocável mmol _c dm ⁻³	Ap	2	0	3	0	0	0
	AB	4	8	7	2	0	3
	BA	5	8	8	8	4	8
	Bw1	3	4	4	3	3	4
	Bw2	3	3	3	4	0	4
Matéria Orgânica, g dm ⁻³	Ap	33	35	29	30	24	20
	AB	21	19	20	20	15	15
	BA	19	18	17	15	9	13
	Bw1	13	14	16	11	9	8
	Bw2	12	10	10	11	7	8
P disponível, mg dm ⁻³	Ap	51	43	21	21	35	16
	AB	3	5	4	5	4	4
	BA	2	2	3	2	2	3
	Bw1	1	2	2	2	2	2
	Bw2	2	2	2	2	2	2
Soma de Bases (Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺⁺ + K ⁺), mmol _c dm ⁻³	Ap	79,7	85,6	48,3	58,3	64,5	50,4
	AB	20,0	16,9	15,5	39,2	20,1	16,4
	BA	16,7	11,2	9,7	8,2	7,8	8,0
	Bw1	11,8	9,6	9,5	6,5	6,5	4,1
	Bw2	4,9	6,7	2,2	2,2	5,5	2,2
CTC (mmol _c dm ⁻³)	Ap	138	124	120	100,3	89,5	78,4
	AB	108	105	104	97,2	58,1	74,4
	BA	97	75	82	88,2	49,8	60,0
	Bw1	64	62	74	58,5	40,5	42,2
	Bw2	52	45	44	44,2	33,5	44,2
Mineralogia da Fração Argila	Bw1	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al

[†]Horizontes, ^{††} Campo Nativo (estepe subtropical), [‡] Plantio Direto (10 anos) – Material de Origem: folhelho da formação Ponta Grossa, ^{†††} Plantio Direto (20 anos) – Material de Origem: material retrabalhado das formações Ponta Grossa e Furnas, ^{††††} Plantio Direto (10 anos) – Material de Origem: arenito da formação Furnas, Cao (Caolinita), Gb (Gibbsita), Vm-Al (Vermiculita aluminizada), Hm (Hematita), Gt (Goetita), M.arg. (muito argilosa) Arg (argila), Arg.Ar (argilo-arenosa), Fr.Arg.Ar (franco argilo-arenosa), * meia encosta, ** dados não coletados.

Os solos das quatro áreas de estudo foram classificados como LATOSSOLOS VERMELHOS Distróficos típicos A moderado (Typic Hapludox). Apresentaram algumas distinções ao 5º nível categórico (nível de família) de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999). Sendo assim, a textura variou de média (PD20 e PD10FN) a muito argilosa (CN e PD10PG), o percentual de bases no complexo sortivo dos solos cultivados em PD enquadrou-os como hipodistróficos e a elevada saturação por alumínio dos solos do campo nativo classificou-os como álicos. Apesar das diferenças no material de origem, a mineralogia da fração argila apresentou-se qualitativamente bastante similar (Tabela 2) tendo em vista a avançada maturidade dos solos. Quantitativamente ocorreram algumas diferenças (EMBRAPA, 1999) distinguindo-os como: cauliniticos no CN, caulinitico-oxidicos na área PD10PG e predominantemente gibbsiticos-oxidicos nas áreas PD10FN e PD20 (Tabela 17, do Anexo). Os valores da densidade do solo variaram de acordo com a textura e o conteúdo de matéria orgânica. As análises químicas dos solos da área de campo nativo evidenciaram os baixos valores de pH, P e bases trocáveis dos solos da região dos “Campos Gerais” (Tabela 2).

Foram exploradas neste estudo somente as relações entre os atributos dos solos e topográficos medidos na camada de 0 – 0,10 m. A similaridade do relevo nas quatro áreas pode ser observada nas representações tridimensionais topográficas (DEMs) (Figura 5) obtidas através da interpolação dos dados de altitude em uma grade regular de 5,0 metros. Usando-se as análises topográficas descritas anteriormente foram calculados os valores para altitude relativa (AR), declividade (DECL) e grau de exposição solar (EXP) que podem ser visualizados na Figura 6. AR foi o atributo topográfico melhor correlacionado com os atributos do solo (Tabelas 3a e 3b). Os valores de AR positivos estão localizados acima da altitude média e os negativos abaixo desta altitude, onde os valores de AR são nulos. Os coeficientes de correlação de Pearson entre AR e MO foram menores no campo nativo ($r = 0,30^*$) do que nas áreas cultivadas em PD ($r = 0,37^{**}$, $r = 0,60^{***}$, $r = 0,66^{***}$, para PD10PG, PD10FN e PD20 respectivamente), evidenciando a tendência de concentração de MO nas posições mais

Figura 5. Modelo de Elevação Digital (DEM) das quatro áreas de estudo: a) CN; b) PD10PG; c) PD20; d) PD10FN. As escalas referem-se às altitudes em metros. Referir-se à Tabela 2 para descrição das áreas.

Figura 6. Modelo de Elevação Digital (DEM) e atributos topográficos derivados dos DEMs das quatro áreas de estudo. (RelElev = altitude relativa, Aspect = exposição solar, Slope = declividade; (a) campo nativo, (b) PD10PG, (c)PD10FN, (d) PD20). Referir-se à Tabela 2 para descrição das áreas.

Tabela 3a. Coeficientes de correlação de Pearson ($n = 40$) de atributos selecionados dos solos das áreas CN (campo nativo) e PD10PG (Plantio Direto – 10 anos – material de origem: folhelho da formação Ponta Grossa)

Áreas	Variáveis [†]										
	MO	P	AI	Ac.P.	S.Bases	CTC	Argila	Ds	Alt	AR	EXP
CN	pH	0.24	-0.21	-0.49**	-0.63***	0.40*	0.12	-0.23	0.38*	0.43**	0.11
	MO	1.00	0.11	-0.34*	-0.17	0.26	0.17	-0.10	0.30*	0.30*	-0.11
	P		1.00	0.14	0.06	0.06	-0.32*	0.09	-0.51***	-0.52***	-0.26
	AI			1.00	-0.47**	0.63***	-0.11	0.00	-0.48**	-0.53***	-0.04
	Ac.P.				1.00	0.71***	0.06	-0.15	-0.28	-0.34*	-0.22
	S.Bases					1.00	0.15	-0.07	0.12	0.15	0.15
	CTC						1.00	-0.17	-0.26	-0.32*	-0.19
	Argila							1.00	0.75***	0.71***	0.02
	Ds								-0.42**	-0.39**	0.22
	Alt								1.00	0.99***	-0.06
PD10PG	pH	0.02	-0.03	-0.59***	-0.90***	0.31*	-0.09	0.06	0.04	-0.05	0.23
	MO	1.00	-0.01	-0.19	0.08	0.35*	0.57***	-0.33*	0.48**	0.37**	0.32*
	P		1.00	0.25	0.10	0.09	0.32*	-0.22	0.29	0.23	0.18
	AI			1.00	0.65***	-0.23	-0.02	0.09	-0.02	-0.07	0.04
	Ac.P.				1.00	-0.15	0.17	-0.11	0.02	0.07	-0.10
	S.Bases					0.76**	-0.15	-0.03	-0.11	-0.25	0.22
	CTC						-0.06	-0.15	-0.15	-0.31*	0.24
	Argila						1.00	-0.34*	0.79***	0.74***	0.37**
	Ds							1.00	-0.41**	-0.43**	-0.08
	Alt								1.00	0.90***	0.55***
EXP	AR									1.00	0.26
	EXP										1.00

[†] MO = matéria orgânica; Ac.P. = Acidez Potencial; S.Bases = Σ de Ca, Mg, K; Ds = Densidade do solo; Alt = Altitude; AR = Altitude Relativa; EXP = grau de exposição solar; DECL = declividade; Níveis de significância estatística representados por: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

Tabela 3b. Coeficientes de correlação de Pearson ($n = 55$) de atributos selecionados dos solos das áreas PD10FN (Plantio Direto – 10 anos – material de origem: arenito da formação Furnas) e PD20 (Plantio Direto – 20 anos – material de origem: material retrabalhado das formações Ponta Grossa e Furnas)

Áreas	Variáveis [†]													
	MO	P	AI	Ac.P.	S.Bas.	CTC	Argila	Ds	Alt	AR	EXP	DECL	Rend.	UG
PD10FN	pH	-0.08	0.30*	-0.74***	0.66***	0.05	-0.22	0.09	0.07	0.07	0.26	-0.15	-	-
	MO	1.00	0.13	0.45**	0.54***	0.83***	0.79***	-0.60***	0.62***	0.60***	-0.12	-0.06	-	-
	P		1.00	-0.17	0.46**	0.25	-0.06	-0.19	0.02	0.00	-0.07	0.20	-	-
	AI			1.00	0.79***	0.09	0.19	-0.23	0.03	0.04	-0.18	0.10	-	-
	Ac.P.				1.00	0.47**	0.60***	-0.47**	0.35*	0.32*	-0.18	-0.11	-	-
	S.Bas.					1.00	0.41**	-0.40*	0.45**	0.42**	0.09	-0.12	-	-
	CTC						0.81***	-0.70***	0.67***	0.62***	-0.05	-0.18	-	-
	Argila							-0.76***	0.82***	0.80***	0.03	-0.20	-	-
	Ds								-0.63***	-0.61***	0.13	0.00	-	-
	Alt									1.00	0.99***	0.39*	-0.47**	-
PD20	AR									1.00	0.43**	-0.48**	-	-
	EXP										1.00	-0.73***	-	-
	pH	0.43**	0.38*	0.59***	0.81***	0.51***	-0.23	-0.33*	0.63***	0.54***	-0.40*	-0.15	-0.18	0.31*
	MO	1.00	0.45**	-0.16	0.52***	0.72***	0.32*	-0.78***	0.49***	0.66***	-0.75***	-0.20	-0.45**	0.50***
	P		1.00	-0.04	0.26	0.59***	-0.12	-0.21	0.23	0.20	-0.16	-0.38*	-0.40**	0.36*
	AI			1.00	0.68***	-0.05	0.19	0.16	-0.37*	-0.35*	0.32*	-0.14	-0.04	-0.05
	Ac.P.				1.00	-0.24	0.37*	0.02	-0.38*	-0.23	0.13	0.02	-0.07	-0.03
	S.Bas.					0.81***	-0.01	-0.43**	0.48**	0.42**	-0.46**	-0.17	-0.19	0.28
	CTC						0.31*	-0.62***	0.37*	0.41**	-0.58	-0.23	-0.34*	0.38*
	Argila							-0.44**	-0.27	-0.18	-0.30*	0.08	-0.37*	0.12
PD20	Ds						1.00	1.00	-0.42**	-0.61***	0.67***	0.13	0.41**	-0.49**
	Alt								1.00	0.89***	-0.47**	0.07	0.03	0.35*
	AR									1.00	-0.64***	0.02	-0.03	0.45**
	EXP										1.00	0.05	0.17	-0.57**
	DECL											1.00	0.29	-0.15
	Rend.													1.00

[†] MO = matéria orgânica; Ac.P. = Acidez Potencial; S.Bas. = Σ de Ca, Mg, K; Ds = Densidade do solo; Alt = Altitude; AR = Altitude Relativa; EXP = grau de exposição solar; DECL = declividade; Rend = Rendimento do trigo; UG = Unidade do grão de trigo, Níveis de significância estatística representados por: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$

elevadas das vertentes dos solos cultivados no sistema PD. Esta tendência está melhor caracterizada nas áreas PD20 e PD10FN, ou seja, nos solos de textura argilo-arenosa e franco argilo-arenosa, respectivamente e podem ser visualizadas nas Figuras 20 a 27 do Anexo. Consequentemente a densidade do solo nestas áreas apresentou coeficiente de correlação negativa com AR ($r = -0,60^{***}$, em ambas áreas). Foi também encontrada correlação positiva entre AR e CTC ($r = 0,41^{**}$, $r = 0,62^{***}$, nas áreas PD20 e PD10FN respectivamente) e soma de bases ($r = 0,42^{**}$, em ambas áreas acima citadas) (Tabelas 3a e 3b).

O coeficiente de correlação de Pearson entre acidez potencial e CTC no CN apresentou correlação positiva e altamente significativa ($r = 0,98^{***}$), o mesmo não ocorrendo nos demais tratamentos ($r = -0,15^{ns}$; $0,47^{**}$; $-0,24^{ns}$) nas áreas PD10PG, PD10FN e PD20 respectivamente (Tabelas 3a e 3b). Esta é uma indicação de que com a conversão do CN em áreas de cultivo no sistema PD por longo período, haja uma tendência de deslocamento do Al^{3+} e H^+ dos sítios de troca das argilas em favor das bases trocáveis, resultando no aumento do pH (Tabela 2). Além disso, nas áreas cultivadas em PD, a MO está positivamente correlacionada com a CTC ($r = 0,35^{*}$; $0,72^{***}$ e $0,82^{***}$, para NT10PG, NT20 e NT10FN respectivamente) (Tabelas 3a e 3b), portanto aumentando os coeficientes de correlação proporcionalmente a diminuição no teor de argila dos solos (Tabela 2). Estes resultados ressaltam a importância da manutenção da MO no aumento da CTC, e, provavelmente, na carga negativa líquida dos solos, como discutido nos trabalhos de Uehara & Keng (1975) e Uehara (1995). A manutenção dos resíduos culturais na superfície dos solos sob sistema PD pode aumentar a reciclagem e decomposição gradual dos resíduos culturais, resultando em um aumento no carbono orgânico do solo e liberação de bases trocáveis. Por outro lado, a posição de topo, especificamente nesta paisagem, está relacionada com reduzido escoamento superficial, colaborando para a manutenção de fertilizantes, calcário e resíduos culturais. Sanchez (1976) e Uehara (1995) consideraram o aumento da carga negativa líquida e CTC como a melhor prática de manejo em solos de carga variável. Por outro lado, Raij (1969) e Silva et al. (1994) observaram em Latossolos do Estado de São Paulo e região do Cerrado que a matéria orgânica do solo contribuiu em 74 % e

75 % respectivamente, na capacidade de troca de cátions total dos solos, caracterizando a elevada importância da MO nos solos de carga variável.

Os coeficientes lineares e angulares dos atributos topográficos e os coeficientes de determinação (R^2) das relações descrevendo a distribuição da MO, argila, pH, P, CTC, densidade do solo (Ds), umidade do grão de trigo por ocasião da colheita (UG) e rendimento do trigo encontram-se na Tabela 4. As equações de regressão múltipla responderam por 0,29 a 0,53 %, 0,20 a 0,54 %, 0,52 a 0,73 % e 0,32 a 0,65 % da variabilidade dos atributos dos solos medidos nas áreas CN, PD10PG, PD10FN, PD20 respectivamente (Tabela 4). Portanto, o melhor modelo de predição de atributos do solo obtido com o uso destas equações foi encontrado para a área PD10FN, ou seja, para os solos de textura franco argilo-arenosa formados a partir do arenito da formação Fumas. Os atributos melhor estimados foram MO, conteúdo de argila, densidade do solo e CTC (Tabela 4). Em um estudo similar, as equações encontradas por Moore et al. (1993b) em uma área de 5,4 ha no Estado de Colorado/USA, responderam por 41 a 64 % da variabilidade do conteúdo da MO, do pH, da espessura do horizonte A, do P, e dos teores de areia e silte. Neste caso, a declividade e o índice de umidade foram os atributos topográficos melhor correlacionados com os atributos do solo.

As áreas estudadas cobrem uma porção da paisagem relativamente pequena e têm limitada variação dos atributos topográficos. Na aplicação desta metodologia em áreas de paisagem mais heterogênea, outros atributos topográficos, tais como curvatura plana e de perfil, área de captação de água e índice de umidade podem ser importantes (Burrough & MacDonnell, 1998; Moore et al., 1993b).

As equações de regressão foram usadas para estimar a distribuição espacial dos atributos do solo. Nas Figuras 7, 8, 9, 10a e 10b pode-se comparar os mapas de isolinhas de selecionados atributos do solo estimados por krigagem com os mapas obtidos com o uso das equações de regressão linear múltipla nas áreas CN, PD10PG, PD10FN e PD20 respectivamente.

O rendimento do trigo foi medido somente na área PD20 e não apresentou correlação significativa com os atributos topográficos e grande parte dos atributos do solo estudados. Os atributos melhor correlacionados com o rendimento foram:

Tabela 4. Coeficientes lineares, angulares e de determinação (R^2) das equações de regressão relacionando atributos selecionados do solo e plantas aos atributos topográficos derivados do Modelo de Elevação Digital (DEM).

Áreas†	Atributos	MO	Argila	P	pH	Ds	AI	CTC	Rend.	UG	
		-----g Kg ⁻¹		mg Kg ⁻¹		g cm ⁻³	-----mmol _c Kg ⁻¹		Kg/ha	%	
NF	Coef. linear	-	66.7335	6.0514	3.7618	-	18.3147	-	-	-	
	AR	-	0.6399	-0.1968	Coeficiente Angular						
	EXP	-	0.0156	-0.0098	0.0125	-	-0.6954	-	-	-	
	DECL	-	0.7549	0.3317	0.0002	-	-0.0010	-	-	-	
	R ²	-	0.53***	0.41***	-0.0287	-	0.9709	-	-	-	
NT10PG	Coef. linear	25.9306	54.9809	-	0.29**	-	0.32**	-	-	-	
	AR	0.3426	0.8756	-	-	1.1465	-	74.9179	-	-	
	EXP	0.0741	0.0480	-	-	Coeficiente Angular					
	DECL	-0.9160	0.3624	-	-	-0.0070	-	-1.1465	-	-	
	R ²	0.22*	0.54***	-	-	0.0007	-	0.2097	-	-	
NT10FN	Coef. linear	51.5820	51.5933	-	-	0.0093	-	-0.8997	-	-	
	AR	1.0625	1.3868	-	-	0.20*	-	0.21*	-	-	
	EXP	-0.1731	-0.1582	-	-	-	-	187.9827	-	-	
	DECL	-0.1552	-0.2308	-	-	Coeficiente Angular					
	R ²	0.54***	0.73***	-	-	-0.0199	-	3.3044	-	-	
NT20	Coef. linear	74.9363	82.0907	-	5.7831	0.8933	-	186.7169	1883.162	42.1876	
	AR	0.5323	-0.9601	-	0.0571	-0.0087	-	0.3435	11.8447	0.1152	
	EXP	-0.2208	-0.2583	-	-0.0021	0.0031	-	-0.4674	5.6041	-0.0782	
	DECL	-1.5330	0.9710	-	-0.0888	0.0155	-	-3.9100	137.6459	-0.4716	
	R ²	0.65***	0.35**	-	0.32**	0.52***	-	0.38**	0.12	0.35**	

† Referir-se ao Quadro 2 para descrição das áreas; MO (Matéria orgânica), Ds (Densidade do solo), UG (Unidade do grão após colheita), AR = altitude relativa, EXP = grau de exposição solar, DECL = declividade; Níveis de significância estatística representados por: * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001

Figura 7. Atributos do solo estimados por krigagem (a, c, e, g,) e pelo uso de equações de regressão linear múltipla (b, d, f, h) na área de cammo nativo. (clav = areola)

Figura 8. Atributos do solo estimados por krigagem (a, c, e, g) e pelo uso de equações de regressão linear múltipla (mapas imediatamente abaixo dos anteriores), na área PD10PG. Referir-se à Tabela 2 para descrição da área. (OM = matéria orgânica; clay = argila; CEC = CTC; Bd = densidade do solo).

Figura 9. Atributos do solo estimados por krigagem (a, c, e, g) e pelo uso de equações de regressão linear múltipla (b, d, f, h) na área PD10FN. (OM = matéria orgânica; clay = argila; CEC = CTC; Bd = densidade do solo). Referir-se à Tabela 2 para descrição da área.

Figura 10a. Atributos do solo estimados por krigagem (a, c, e, g) e pelo uso de equações de regressão linear múltipla (b, d, f, h) na área PD20. Referir-se à Tabela 2 para descrição da área. (OM = matéria orgânica; clay = argila; GM = umidade do grão de trigo; yield = rendimento).

Figura 10b. Atributos do solo estimados por krigagem (i, k, m, o) e pelo uso de equações de regressão linear múltipla (j, l, n, p) na área PD20. Referir-se à Tabela 2 para descrição da área. (Bd = densidade do solo; CEC = CTC).

MO ($r = -0,45^{**}$), P ($r = -0,40^{**}$), CTC ($r = -0,34^{*}$), argila ($r = -0,37^{*}$), UG ($r = -0,40^{**}$) e Ds ($r = 0,41^{**}$). Estes resultados foram contrários a nossa expectativa e podem ter sido influenciados pela distribuição das chuvas em 1998 (Figura 11). Pode-se observar que as chuvas neste ano, no período que antecedeu a colheita, foram 122 % superiores a média dos anos anteriores. Historicamente, nesta região, chuvas desta natureza têm afetado a produtividade do trigo. O impacto da precipitação elevada durante o desenvolvimento e colheita do trigo pode ter escondido, ou mesmo invertido, os efeitos de atributos dos solos.

Figura 11. Distribuição da precipitação pluviométrica anual: as barras representam a média dos últimos 24 anos e a linha representa o ano de 1998. Fonte: Fundação ABC (1998²).

A abordagem da classificação contínua (técnica *fuzzy k-means*) foi usada tentativamente na identificação e mapeamento de áreas com propabilidade de apresentarem limitações similares e respostas semelhantes à aplicação de fertilizantes. Foi escolhida uma classificação simples, de somente três classes, para explorar a estratégia de definição de zonas de manejo de fertilizantes e corretivos. Somente os resultados obtidos na área PD10FN foram apresentados neste trabalho.

² FUNDAÇÃO ABC. Castro, 1998. Dados climáticos.

Foi considerado o mapeamento de duas qualidades da fertilidade do solo: (1) fertilidade do solo potencial, agrupando-se os valores de MO, conteúdo de argila e CTC nas duas profundidades estudadas. Estes atributos do solo foram escolhidos por serem indicadores chave da fertilidade do solo, principalmente em solos de carga variável, como também por sofrerem alterações mais lentas ao longo do tempo; (2) disponibilidade de nutrientes, expressa pelo teor de Ca, Mg, P e K.

Os grupamentos identificados agrupando-se os valores de MO, argila e CTC caracterizaram zonas com diferente potencial de manejo da fertilidade do solo (Figura 12 – 1a, 1b, 1c). Estes resultados revelaram dependência espacial dos atributos dos solos nas áreas cultivadas. Os centróides das classes (Tabela 5) mostram que a classe “a” está agrupando as áreas de menores valores dos atributos citados, a classe “c” compreende os indivíduos com valores mais elevados destes atributos e a classe “b” concentra o conjunto de indivíduos de valores intermediários. Os centróides das classes representam os valores dos atributos dos indivíduos que são inteiramente representados pela classe, ou seja, que apresentam grau de participação 1,0 na escala de 0,0 a 1,0. O grau de similaridade dos indivíduos ao centróide das classes está representado na escala das Figuras 12 e 13. Portanto, quanto mais se aproximar da cor branca a representação do indivíduo nestas figuras, melhor representado o mesmo estará pelos valores dos centróides da classe (ver explicação mais detalhada na revisão, item 2.6, p.15).

A classificação obtida para os atributos topográficos também dividiu a área em zonas distintas (Figura 12 – 2a, 2b, 2c e Tabela 5). Acrescentando-se os valores de argila aos dos atributos topográficos a distribuição espacial dos grupos de solos gerados foi similar à obtida no grupamento dos indicadores chave citados acima (Figura 12 – 3a, 3b, 3c e Tabela 5). Isto significa que obtendo-se os valores do DEM e agrupando-os aos dados de conteúdo de argila de áreas similares desta região seja possível identificar-se e mapear-se, em primeira instância, zonas de manejo de fertilizantes com razoável acurácia e menor custo, empregando-se o conjunto de técnicas citadas neste trabalho.

Por outro lado, as zonas geradas com os valores de Ca e Mg (Figura. 13 – 1a, 1b, 1c e Tabela 5) e P e K (Figura 13 – 2a, 2b, 2c e Tabela 5) também mostraram

Figura 12. Zonas geradas com os valores de MO, CTC e argila nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m (1a, 1b, 1c), com os valores dos atributos topográficos (2a, 2b, 2c) e com os valores dos atributos topográficos + conteúdo de argila (3a, 3b, 3c) na área PD10FN. Os valores da legenda especificam a taxa de participação dos indivíduos em cada classe.

Figura 13. Zonas geradas com os valores de Ca e Mg (1a, 1b e 1c), de P e K (2a, 2b e 2c) e de Ca, Mg, P, K (3a, 3b e 3c) nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20 m na área PD10FN. Os valores da legenda especificam a taxa de participação dos indivíduos em cada classe.

de controle mais homogêneas. Estas técnicas podem ser também úteis para guiar a amostragem de solos na divisão de glebas em escala mais fina visando o gerenciamento localizado de fertilizantes.

3.6 CONCLUSÕES

1 - O material de origem e o relevo são responsáveis por importantes diferenças nas características dos solos da região dos “Campos Gerais” e portanto estão controlando o comportamento de propriedades importantes no manejo das culturas.

2 - O cultivo de solos no sistema PD por longo período reduziu a acidez potencial, aumentando o pH dos solos. Adicionalmente observou-se aumento na MO, CTC e saturação por bases, principalmente nos solos localizados nas posições mais elevadas das vertentes e formados a partir do arenito da formação Furnas e material retrabalhado das formações Furnas e Ponta Grossa.

3 - O uso de equações de regressão linear múltipla, obtidas a partir de atributos topográficos derivados do DEM e atributos dos solos mostrou-se uma ferramenta promissora na predição de alguns atributos-chave da fertilidade dos solos da região dos “Campos Gerais”, tais como: argila, matéria orgânica, CTC e densidade do solo.

4 - A variabilidade espacial de atributos do solo observada nestas áreas é uma indicação da possibilidade de benefício com a aplicação localizada de fertilizantes.

5 - A técnica *fuzzy k-means* mostrou-se uma ferramenta útil na geração de zonas de manejo de fertilizantes em solos da região dos Campos Gerais.

4 VARIABILIDADE DA FERTILIDADE DO SOLO EM TOPOSSEQUÊNCIAS DA REGIÃO DOS “CAMPOS GERAIS”-PR: AVALIANDO O POTENCIAL PARA O GERENCIAMENTO LOCALIZADO DE FERTILIZANTES

4.1 RESUMO

A Agricultura de Precisão (AP) envolve o gerenciamento localizado de solos e culturas de acordo com as condições específicas da área. Este estudo foi realizado como um passo inicial na avaliação da variabilidade da MO, pH, K, Ca, Mg e rendimento do trigo em três topossequências da região dos “Campos Gerais”– PR, e para avaliar o potencial para AP. As áreas foram selecionadas de acordo com o material de origem e tempo de adoção do sistema plantio direto (PD). A fertilidade do solo foi altamente variável e muito estratificada nas três áreas de estudo. Os teores de MO, Ca e Mg trocáveis aumentaram de acordo com o teor de argila dos solos. O rendimento do trigo apresentou variações, porém, neste ano agrícola, houve baixa correlação desta variável com a fertilidade do solo. A técnica *fuzzy k-means* de agrupamento de variáveis comprovou sua utilidade na criação de zonas de manejo dos fertilizantes e indicou dependência espacial na demanda de P e K. Os atributos dos solos mostraram diferenças na dependência espacial. Modelos geoestatísticos anisotrópicos lineares foram definidos para a maioria das variáveis estudadas. MO foi a variável que apresentou maior dependência espacial. A recomendação de fertilizantes seria similar na aplicação uniforme e no gerenciamento localizado, mas a distribuição de fertilizantes nas áreas seria espacialmente diferente, o que representaria aumento potencial no rendimento do trigo.

4.2 SUMMARY: NUTRIENT VARIABILITY IN LONG-TERM NO-TILLAGE OXISOLS OF SOUTHERN BRAZIL: ASSESSING POTENTIAL FOR SITE-SPECIFIC MANAGEMENT

Site-specific management (SSM) involves the variable management of soils, crops, and pests according to localized conditions within a field. This study was performed as an initial step to assess the variability of OM, pH, P, K, Ca, Mg and wheat yield in three typical Oxisols toposequences of the “Campos Gerais” region, of southern Brazil, and to evaluate the potential for site-specific fertilizer management. The toposequences were selected according to parent material and no-tillage adoption time. Soil fertility was highly variable and very stratified for three studied sites. The values of OM content and exchangeable Ca and Mg increased according to the clay content of the sites. Wheat yield was highly variable but there was little correlation of wheat yield with soil fertility. The fuzzy k-means clustering technique has proven to be useful to create distinctive zones of P and K fertilizer management. The soil properties displayed differences in spatial dependence. Linear anisotropoc geostatistical models were defined for most of the soil variables measured for all sites. Fertilizer recommendation was similar for uniform versus SSM, but the distribution of fertilizer within the field would be spatially different.

4.3 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão (AP) envolve o gerenciamento localizado de solos, culturas, pragas e doenças. Uma série de fatores devem ser satisfeitos para que aja sucesso na aplicação do manejo localizado. Dentre eles estão incluídos o sistema adequado de coleta dos dados, a análise e interpretação eficientes da variabilidade espacial dos dados, o conhecimento da resposta do sistema solo-planta às mudanças de

manejo e evidência de que o manejo espacialmente variável será mais rentável do que as abordagens tradicionais (Moore & Tyndale-Biscoe, 1999).

Devido à natureza espacialmente contínua da paisagem, dos processos de formação do solo e do zoneamento climático é razoável que medidas de solos tomadas em proximidade umas das outras estejam correlacionadas. Também é razoável que variações espaciais e temporais em um ou mais atributos ecológicos estejam relacionadas com variações de outros parâmetros ou propriedades intrínsecas da paisagem (Nielsen & Alemi, 1989).

Como as propriedades e os nutrientes dos solos variam através da paisagem, aplicações uniformes de fertilizantes podem resultar em áreas super ou sub-adubadas. A erosão superficial, ou a lixiviação de áreas super fertilizadas podem contaminar o manancial aquífero, enquanto o rendimento das culturas pode diminuir em áreas sub-fertilizadas (Cahn et al., 1994). Portanto, os modelos espaciais e temporais das propriedades dos solos e atributos indicativos da qualidade do solo devem ser conhecidos para minimizar impactos ambientais e aumentar a rentabilidade. Além disso, para integrar e regionalizar informações de pontos específicos para largas escalas, é essencial o conhecimento da natureza destes modelos (Wendroth et al., 1997).

Tanto a estatística clássica quanto a estatística espacial são úteis no estudo das relações entre variáveis, embora as premissas e os enfoques básicos possam diferir. Enquanto a abordagem clássica enfatiza relações entre variáveis independentemente da distribuição espacial, os métodos da estatística espacial enfatizam correlações e distribuições espaciais das variáveis (Mallarino et al., 1999).

Os métodos geoestatísticos comprovaram sua utilidade para detectar, modelar e estimar os modelos espaciais de diversos tipos de dados, tais como atributos de solos e rendimento de culturas. A geoestatística inclui variografia e krigagem. A variografia é utilizada para caracterizar e modelar a variância espacial dos dados através de semivariogramas. Neste processo, a similaridade entre amostras é determinada em função da distância entre as mesmas. Quando evidente, a dependência espacial pode ser modelada e usada num processo conhecido como krigagem, para estimar-se valores em

localidades não amostradas (Jeffrey, 1993). O desenvolvimento detalhado desta teoria pode ser encontrado em Burgess & Webster (1980), Vieira (1983) e Goovaerts (1997).

Um dos desafios da AP é determinar quais os principais fatores responsáveis pela variação no rendimento das culturas. De acordo com Mulla & Schepers (1997), dentre os fatores mais importantes estão incluídos: infestação de pragas e doenças, matéria orgânica, conteúdo de água disponível, drenagem do solo, disponibilidade de nutrientes, textura do solo e pH.

O clima interage de maneira complexa com a topografia afetando o rendimento das culturas. Propriedades físicas dos solos, tais como conteúdo de argila e areia (Ovalles & Collins, 1986; Sá, 1995) e teor de matéria orgânica (Miller et al., 1998; Bhatti et al., 1991) foram altamente correlacionados com a posição na vertente. A interdependência entre o rendimento das culturas e propriedades dos solos tem sido mostrada por vários autores (Ciha, 1984; Mulla et al., 1992; Pierce, 1995). Ciha (1984) demonstrou que o rendimento do trigo estava principalmente relacionado com a posição da vertente. Esta relação podia ser notada especialmente nos anos secos, parecendo ser dependente da profundidade da camada superficial. O estudo de Timlin et al. (1998) sugere que a topografia e fatores relacionados, tais como profundidade e drenagem do solo, tenham tido um grande efeito no rendimento do milho. O rendimento de grãos tem sido mais fortemente relacionado com propriedades do solo relacionadas com a capacidade de retenção de água (Stone et al., 1985; Hanna et al., 1982; Pierce et al., 1995; Cora, 1997). De acordo com Moore & Tyndale-Biscoe (1999) o rendimento é uma variável difícil de ser traduzida em estratégias de manejo, pelo fato de integrar muitas variáveis que afetam o desenvolvimento das culturas e por apresentar diferentes tendências de ano para ano.

A variabilidade do solo pode ocorrer naturalmente, como resultado da complexidade geológica e processos pedogenéticos, ou por processos antropogênicos. A introdução do sistema plantio direto (PD) no Brasil, no início da década de 1970 proporcionou uma técnica para o controle da erosão (Ramos, 1976; Wunche & Denardin, 1978; Mondardo, 1978; Derpsch et al., 1986; Blevins et al., 1997) e aumento da matéria orgânica do solo (Sidiras & Pavan, 1985; Thomas, 1990; Sá, 1997; Kinsela,

1997). Atualmente, 32 % da área cultivada com grãos no Brasil (cerca de 13,5 milhões de ha) são manejadas no sistema PD, das quais 70,5 % estão localizadas na região sul do país (FEBRAPDP, 2000). Por outro lado, os solos formados sobre os folhelhos da formação Ponta Grossa e os arenitos da Formação Furnas no ecossistema dos “Campos Gerais”- PR assumem significativa importância pelo seu potencial na produção intensiva de grãos.

Este trabalho foi realizado como uma primeira etapa na avaliação da variabilidade da MO, pH, P, K, Ca, Mg e rendimento do trigo e para verificar o potencial para o manejo localizado de fertilizantes em solos da região dos “Campos Gerais”- PR.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na fazenda Santa Branca (50° 23' W; 24° 36' S) próximo da cidade de Tibagi, localizada na região centro-sul do Estado do Paraná (Figura 1, capítulo 3, p.26).

A topografia das áreas selecionadas para este estudo é constituída por longas vertentes de forma predominantemente convexa, de declive suave (0 - 6%) e altitude variando entre 790 e 910 metros. A vegetação natural, denominada “Campos Gerais”, constitui-se de estepe subtropical de gramíneas baixas (Maack, 1981). O clima da região enquadra-se como subtropical úmido de altitude, tipo Cfb (classificação de Koeppen), com precipitação pluviométrica média de 1532 mm bem distribuídas durante o ano (Maack, 1981). A litologia da área estudada é constituída essencialmente por sedimentos clásticos do período devoniano, grupo Paraná, denominados formação Furnas e Ponta Grossa (Trein et al., 1966).

Foram selecionadas três topossequências com área de 10 ha (200 x 500 m), representativas da região: duas áreas cultivadas em rotação de culturas por 10 anos (PD10FN, PD10PG) e uma por 20 anos (PD20) no sistema PD. A escolha destas áreas baseou-se no material de origem e textura dos solos, no tipo de vertente e nas práticas

culturais. Um resumo das práticas culturais pode ser observado na Tabela 1 (capítulo 3, p. 27).

As amostras foram obtidas nos nós de grades de 50 x 50 m ($N = 55$) em Maio/1988, após a colheita do milho e antes da semeadura do trigo (Figura 3, capítulo 3, p. 29). Utilizou-se teodolito e fita métrica para melhor definição da grade e o georreferenciamento dos pontos limítrofes das áreas foi obtido através do Sistema de Posicionamento Global (GPS). As medidas de altitude em cada ponto da grade foram obtidas com uso de teodolito.

As amostras de solo foram coletadas em duas profundidades (0-0,10 e 0,10-0,20 m) em buracos de dimensão 0,20 x 0,20 m, retirando-se fatias de 0,020 m de espessura dos quatro lados, para cada profundidade, obtendo-se duas amostras compostas em cada nó. As amostras foram secas ao ar, passadas através de peneiras de 2,0 mm e estocadas para as análises subsequentes. Foram coletadas amostras indeformadas nos mesmos lugares e às mesmas profundidades para as medidas de densidade global.

Foram abertas três trincheiras de 1,50 m de profundidade em cada área de estudo para a descrição morfológica (Lemos & Santos, 1996) e análises físicas, químicas e mineralógicas dos perfis (Figura 3, capítulo 3, p. 29).

As medidas de rendimento da cultura do trigo foram obtidas através de colheita manual de seis linhas de trigo, numa seção de 4,0 m de comprimento, sempre imediatamente acima dos pontos de amostragem do solo. Mediu-se a umidade dos grãos de trigo em todos os locais de coleta ajustando-se o peso para 13% de umidade.

Foram efetuadas análises químicas nas frações de solo < 2 mm. O pH foi medido por potenciometria usando uma solução 1:2 de solo/0,01 M CaCl_2 . Al, Ca, Mg e K trocáveis e P foram extraídos usando-se resina trocadora de cátions/ânions (Raij et al., 1987). A acidez potencial foi determinada usando-se uma solução tamponada a pH 7,0, de acordo com Raij et al., 1987). O carbono foi determinado por combustão úmida (EMBRAPA, 1997). As frações areia, silte e argila foram separadas, após agitação horizontal de 16 horas, usando-se solução de hexa-metafosfato de sódio como dispersante químico, pelo método do hidrômetro (EMBRAPA, 1997). A densidade global foi determinada pelo método do cilindro volumétrico, descrito por Blake & Hartge

(1986), utilizando-se cilindros com volume interno de cerca de 100 cm³. A difração de Raio-X foi medida por um difratômetro Philips tipo PW3710 BASED com tubo de cobre, de acordo com Jackson (1969).

A recomendação de fertilizantes foi calculada para cada ponto da grade (gerenciamento localizado) e pela média (adubação uniforme, ou convencional) de acordo com a recomendação do IAC (Raij et al., 1996) para atingir rendimentos superiores a 3,0 ton/ha. O potencial de resposta do rendimento do trigo foi estimado através da curva de resposta de fertilizantes (Comissão de Fertilidade do Solo, RS/SC, 1995).

A afinidade entre os atributos do solo e o rendimento do trigo foi avaliada através do coeficiente de correlação de Pearson com o programa JMP, versão 3,0 para Windows (Statistical Discovery Software – SAS, 1997). A significância estatística foi analisada para $p < 0,05$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$ e representada por *, ** e ***, respectivamente. O programa GS+ for Windows, versão 3.0 (Gamma Design software, 1999) foi usado para realizar as análises geoestatísticas. Cada parâmetro foi submetido a análise de semivariância para cada um dos cinco modelos isotrópicos e anisotrópicos: linear, linear/sill, esférico, exponencial e gaussiano, de acordo com a teoria das variáveis regionalizadas descrita por Journel & Huijbregts (1978) e Goovaerts (1997).

O programa “Fuzme, Fuzzy k-Means with Extragrades” (Australian Centre for Precision Agriculture, 1999) foi usado tentativamente como ferramenta para gerar zonas de recomendação de fertilizantes usando a técnica “fuzzy k-means”. A base matemática do agrupamento *fuzzy k-means* e os algoritmos computacionais para a análise dos dados foram detalhados por Burrough (1989), McBratney & Gruijter (1992), e Odeh et al. (1992). O algoritmo *fuzzy k-means* e a medida métrica de distância Mahalanobis foram usados para gerar três classes de solos de acordo com a demanda de fertilizantes. Porém neste caso, o parâmetro de controle do programa (expoente *fuzziness*) foi ajustado para produzir classes mais rígidas preferencialmente às classes “fuzzy” ou contínuas (expoente Fuzzy = 1.1). A maior parte dos estudos de classificação de solos tem usado valores de expoente *fuzziness* entre 1,1 e 1,5. Onde o expoente é 1, a classificação não produz sobreposição de classes, resultando em classes rígidas. O aumento dos valores

causa mais *fuzziness* (representando maior continuidade) (ver maior detalhamento desta técnica no capítulo 2, item 2.6, p.15). Os mapas com o delineamento das zonas de demanda de fertilizantes P e K foram criados com o programa Surfer 7.0 (Golden Software, Inc., 1999) usando vizinhos naturais (“natural neighbor”) como método de interpolação.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Perfis de solos

Dados selecionados de análises morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas dos perfis de solos das quatro topossequências estão apresentados na Tabela 2 (capítulo 3, p. 32 e 33, como também nas Figuras 16, 17 e 18, do Anexo). A textura do solo está refletindo as diferenças do material de origem. As áreas de campo nativo e PD10PG, formadas sobre o folhelho Ponta Grossa apresentaram textura muito argilosa. A textura da área PD10FN, cujo material de origem é o arenito da formação Furnas, apresentou-se predominantemente franco argilo-arenosa, enquanto a área PD20, formada com material retrabalhado destas duas formações, apresentou teor intermediário de argila (argilo-arenosa).

Os solos das quatro áreas de estudo foram classificados como LATOSSOLOS VERMELHOS Distróficos típicos A moderado (Typic Hapludox). Apresentaram algumas distinções ao 5º nível categórico (nível de família) de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999). Sendo assim, a textura variou de média (PD20 e PD10FN) a muito argilosa (PD10PG). Apesar das diferenças no material de origem, a mineralogia da fração argila apresentou-se qualitativamente bastante similar tendo em vista a avançada maturidade dos solos (Tabela 2, capítulo 3, p. 32 e 33). Quantitativamente ocorreram algumas diferenças distinguindo-os como: predominantemente caulinitico-oxídicos na área PD10PG e gibbsiticos-oxídicos nas áreas PD10FN e PD20 (EMBRAPA, 1999) (ver Tabela 17, do Anexo). Os valores da densidade do solo variaram de acordo com a textura e o conteúdo de matéria orgânica.

4.5.2 Estatística clássica

A fertilidade do solo foi altamente variável espacialmente e muito estratificada nas três áreas amostradas (Tabela 6). Por outro lado, o efeito do espaçamento da grade de amostragem (50 ou 100 m) na média dos atributos estudados foi insignificante (Tabela 7).

A média dos valores de pH nas três áreas variou entre 5,0 - 5,2 (0-0,10 m de profundidade) e 4,5 - 4,6 (0,10 - 0,20 m de profundidade) portanto enquadrados na classe média e baixa respectivamente de acordo com a classificação proposta por Raij et al. (1996) (Tabela 6). Por outro lado, a variação pontual do pH variou em 1,3 (PD10PG e PD10FN) e 2,1 (PD20) unidades nas duas profundidades estudadas, alcançando as classes alta e muito alta na camada de 0 - 0,10 m. A maior variação ocorreu na área PD20.

Os valores de fósforo (P) variaram da classe muito baixa à média (PD10PG) e baixa à alta (PD10FN e PD20) na camada de 0 - 0,10 m e de muito-baixa a média na camada de 0,10 - 0,20 m. As maiores variações ocorreram na área PD20 e PD10FN onde o P disponível variou num fator de 5 e 6,5 respectivamente. Embora tenha sido aplicada a mesma quantidade de fertilizante nas três áreas, o aumento do nível de P foi menor na área PD10PG provavelmente devido ao mais elevado teor de argila e, conseqüentemente, à maior contribuição dos óxido-hidróxidos de Fe e Al na adsorção de P. Por outro lado, o nível da matéria orgânica nesta área está alto nas duas profundidades e, em média, mais elevado em relação às demais áreas, demonstrando a habilidade dos componentes da fração argila deste solo na formação de complexos estáveis com a matéria orgânica. Entretanto, a maior variabilidade de MO foi observada na área PD20. O limite superior dos valores de MO foram coincidentes nestas duas áreas a despeito do maior teor de argila na área PD10PG. Esta é uma indicação de que o maior tempo de cultivo sob o sistema plantio direto na área PD20 possa estar contribuindo para a concentração da MO em localidades específicas da área.

Tabela 6. Sumário estatístico de atributos do solo nas três áreas amostradas no sistema de grade (N = 55) na fazenda Santa Branca/PR.

Atributos	Prof. (m) [†]	Parâmetro	Área ^{**}		
			PD10PG	PD20	PD10FN
pH	0-0.10	Média	5.1	5.2	5.0
		Desv. Padrão	0.3	0.4	0.3
		Amplitude ^{***}	4.6 - 5.9	4.4 - 6.5	4.4 - 5.6
	0.10-0.20	Média	4.6	4.5	4.5
		Desv. Padrão	0.3	0.3	0.4
		Amplitude	4.2 - 5.4	4.1 - 6.0	4.0 - 5.3
MO (g dm ⁻³)	0-0.10	Média	39	34	25
		Desv. Padrão	5	6	5
		Amplitude	31 - 49	21 - 49	18 - 37
	0.10-0.20	Média	30	22	19
		Desv. Padrão	4	3	3
		Amplitude	19 - 39	15 - 29	13 - 27
P (mg dm ⁻³)	0-0.10	Média	10	23	21
		Desv. Padrão	5	9	8
		Amplitude	4 - 27	8 - 40	7 - 46
	0.10-0.20	Média	5	5	7
		Desv. Padrão	2	3	2
		Amplitude	2 - 9	2 - 19	4 - 14
K trocável (mmol _c dm ⁻³)	0-0.10	Média	3.8	3.2	3.5
		Desv. Padrão	1.4	0.8	1.3
		Amplitude	1.2 - 7.7	1.3 - 5.2	1.4 - 6.7
	0.10-0.20	Média	2.3	2.5	2.3
		Desv. Padrão	1.2	0.9	0.6
		Amplitude	0.9 - 8.8	1.2 - 5.4	1.0 - 3.7
Ca trocável (mmol _c dm ⁻³)	0-0.10	Média	52	44	34
		Desv. Padrão	11	13	10
		Amplitude	30 - 85	21 - 82	17 - 61
	0.10-0.20	Média	29	19	15
		Desv. Padrão	11	9	8
		Amplitude	12 - 58	7 - 59	5 - 45
Mg trocável (mmol _c dm ⁻³)	0-0.10	Média	24	17	14
		Desv. Padrão	7	8	5
		Amplitude	12 - 51	7 - 41	7 - 31
	0.10-0.20	Média	21	9	9
		Desv. Padrão	10	5	4
		Amplitude	7 - 48	2 - 38	2 - 22

[†] Profundidade de amostragem; ^{**}PD10PG = Plantio Direto (10 anos) – Material de Origem: folhelho da formação Ponta Grossa, PD20 = Plantio Direto (20 anos) – Material de Origem: material retrabalhado das formações Ponta Grossa e Furnas, PD10FN = Plantio Direto (10 anos) – Material de Origem: arenito da formação Furnas

^{***} Refere-se aos valores mínimos e máximos dos atributos

Tabela 7. Efeito do espaçamento de amostragem na média de atributos do solo nas três áreas do estudo.

Áreas [‡]	PD10PG		PD10FN		PD20	
Espaçamento (m)	50	100	50	100	50	100
Atributos						
pH	5.2	5.2	5.0	4.9	5.3	5.3
MO	39	40	25	26	34	34
P	11	10	21	20	23	22
K	3.8	4.1	3.5	3.3	3.2	3.3
Ca	52	53	34	31	44	46
Mg	24	25	14	13	17	18

[‡]Referir-se a Tabela 6 (ou Tabela 15 do Anexo) para descrição das áreas e unidades.

A média dos valores de potássio (K) atingiu o nível médio (0,10 – 0,20 m) e alto (0 – 0,10 m) mas os valores variaram da classe baixa à muito alta. Os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) estão aumentando de acordo com o teor de argila e MO nas três áreas. A média dos valores de Ca enquadrrou-se na classe média (0 – 0,10 m) e baixa (0,10 – 0,20 m) enquanto a média dos valores de Mg foi baixa em ambas profundidades. Porém, os valores de Ca variaram da classe baixa à média na área PD10FN e da classe baixa a alta nas demais áreas enquanto o Mg variou da classe baixa à média na camada de 0 – 0,10 m (Tabela 6).

Em geral, a maior variabilidade espacial foi observada na área PD20, indicando que o maior tempo sob o sistema PD possa estar contribuindo para o aumento da variabilidade espacial nas áreas de estudo. A maior variabilidade no conteúdo de MO nesta área e a tendência de concentração de MO em pontos específicos do terreno pode estar controlando a variabilidade espacial de outros atributos. Pierce et al. (1995), estudando a variabilidade espacial de nutrientes em solos do estado de Michigan/USA, também encontraram grande estratificação e variabilidade em áreas cultivadas no sistema PD.

As correlações entre atributos do solo foram mais elevadas quando analisadas em cada transeção ao longo da vertente (N = 11) (Figura 3, capítulo 3, p. 29) do que na grade como um todo (N = 55) (Tabela 8). Esta observação indica que tendências de variabilidade de atributos relativamente nítidas ao longo das topossequências possam estar sendo atenuadas pela variabilidade espacial dentro da área como um todo.

Tabela 8. Coeficiente de correlação de Pearson de atributos selecionados em todos os pontos da grade de amostragem (N = 55) e em cada um dos 5 transeptos ao longo das vertentes (N = 11) nas três áreas estudadas.

Atributos correlacionados†	Áreas††	Toda a grade‡	Transeções‡‡				
			1	2	3	4	5
	PD10PG						
MO x S. Bases*		0.29	0.34	-.***	0.36	*	0.32
MO x Argila		0.45	0.68	0.71	0.41	0.68	-
MO x P		-	-	0.28	-	0.51	0.80
CTC x S. Bases		0.85	0.92	0.94	0.72	0.62	0.71
CTC x MO		0.47	0.34	-	0.54	0.75	0.70
CTC x Argila		-	-	-	-	0.36	0.44
Alt** x CTC		-	0.38	-	-	-	0.63
Alt x Argila		0.77	0.83	0.80	0.83	0.80	0.69
Alt x S. Bases		-	0.36	-0.30	-	-0.40	0.48
Alt x pH		-	-	-	0.27	-0.40	0.40
Alt x P		0.34	-	0.32	0.25	0.68	0.64
	PD20						
MO x S. Bases		0.63	0.81	0.75	0.54	0.58	0.61
MO x Argila		0.28	0.46	-	-	-	-
MO x P		0.44	0.83	0.31	-	0.72	0.71
CTC x S. Bases		0.86	0.95	0.76	0.95	0.89	0.91
CTC x MO		0.77	0.87	0.83	0.53	0.72	0.65
CTC x Argila		0.27	-	-	-	-	-
Alt x CTC		0.42	0.86	0.58	0.44	0.30	0.29
Alt x Argila		-0.29	0.50	-	-	-0.77	-0.47
Alt x S. Bases		0.52	0.84	0.50	0.56	0.46	0.38
Alt x pH		0.67	0.84	0.73	0.78	0.55	0.50
Alt x P		0.32	0.79	-	-	-	0.54
	PD10FN						
MO x S. Bases		0.61	0.74	0.76	0.49	0.63	0.63
MO x Argila		0.79	0.55	0.80	0.94	0.75	0.70
MO x P		-	0.55	-	0.42	-	-
CTC x S. Bases		0.73	0.85	0.89	0.89	0.87	0.73
CTC x MO		0.84					
CTC x Argila		0.72	0.70	0.93	0.93	0.68	0.72
Alt x CTC		0.66	0.67	0.79	0.83	0.82	0.86
Alt x Argila		0.70	0.88	0.88	0.93	0.94	0.90
Alt x S. Bases		0.42	0.45	0.70	0.35	0.57	0.57
Alt x pH		-	-	-	-	-	-
Alt x P		-	-	-	0.32	-0.36	-

†(0 – 0,10 m de profundidade), ††Referir-se a Tabela 6 (p.62) (ou Tabela 15 do Anexo) para descrição das áreas, ‡(n = 55), ‡‡ (n = 11), *Soma de Bases (Ca + Mg + K trocáveis),

** Altitude

4.5.3 Recomendação de fertilizantes

As recomendações de fertilizantes foram calculadas de acordo com Raij et al. (1996). Na Tabela 9 pode-se comparar a quantidade de fertilizante recomendada na aplicação baseada na média (aplicação uniforme ou convencional), no gerenciamento localizado (aplicação de acordo com a demanda em cada ponto da grade) e por zonas de manejo de fertilizantes, geradas com a utilização da técnica *fuzzy k-means*. Os valores de P e K recomendados de acordo com o gerenciamento localizado foram agrupados usando o programa “Fuzme” para gerar zonas de recomendação de fertilizantes (P e K), que podem ser visualizadas no mapa produzido pelo programa “Surfer” (Figura 14). Pode-se observar que nestes dois últimos casos não houve alteração na quantidade de fertilizantes recomendada (Tabela 9).

A Tabela 10, que apresenta os valores dos centróides das três classes, mostra a combinação das recomendações de P e K para cada área. Os centróides das classes representam a demanda de fertilizantes P e K na classe considerada. Assim, por exemplo, na zona representada pela classe “a”, a demanda de fertilizantes seria de 60 Kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 10 Kg ha⁻¹ de K₂O. Na classificação contínua, os centróides das classes representam os indivíduos que são inteiramente representados pela classe, ou seja, que apresentam grau de participação 1,0 na escala de 0,0 a 1,0 (ver escala apresentada na Figura 14). Portanto, o grau de similaridade dos indivíduos ao centróide das classes está representado nesta escala. Quanto mais se aproximar da cor branca a representação do indivíduo, melhor representado o mesmo estará pelos valores dos centróides da classe.

As zonas de manejo de fertilizantes estão indicando dependência espacial na demanda de P e K nas três áreas de estudo (Figura 14). Os centróides das classes (Tabela 10) mostram que a classe “a” está agrupando áreas de menor demanda de P e K. Principalmente nas áreas PD10PG e PD10FN, parece estar havendo uma tendência de concentração de fertilizantes nas posições superiores da vertente (topo, ombro e meia encosta superior) (Figura 14, Tabela 10) (ver também Figuras 22 a 27 do Anexo).

Tabela 9. Comparação da recomendação de fertilizantes (P e K) na aplicação uniforme (pela média, ou convencional) e no gerenciamento localizado.

Recomendação de Fertilizantes					
Área†	Fertilizante	Profundidade	Uniforme	Gerenciamento localizado	
				Ponto a ponto	Zonas de fertilidade
		m	-----Kg ha ⁻¹ -----		
PD10PG	P ₂ O ₅	0 – 0.10	60	65	67
		0.10 – 0.20	90	87	87
		0 – 0.20	75	76	77
	K ₂ O	0 – 0.10	10	14	12
		0.10 – 0.20	20	23	24
		0 – 0.20	15	19	18
	P ₂ O ₅	0 – 0.10	40	45	45
		0.10 – 0.20	90	84	85
		0 – 0.20	65	65	65
PD20	K ₂ O	0 – 0.10	10	15	13
		0.10 – 0.20	20	20	21
		0 – 0.20	15	17	17
	P ₂ O ₅	0 – 0.10	40	44	44
		0.10 – 0.20	60	77	76
		0 – 0.20	50	60	60
PD10FN	K ₂ O	0 – 10	10	14	13
		10 – 20	20	20	22
		0 – 20	15	17	17
	P ₂ O ₅	0 – 0.10	40	44	44
		0.10 – 0.20	60	77	76
		0 – 0.20	50	60	60

† Referir-se a Tabela 6 (p.62) ou Tabela 15 do Anexo para descrição das áreas.

Tabela 10 –Centróides das três classes dos grupamentos gerados pelo programa “Fuzme” a partir da recomendação de fertilizantes no gerenciamento localizado.

Classes		Centróides					
Áreas‡	Fertilizantes	PD10PG		PD20		PD10FN	
		P	K	P	K	P	K
	a	60	10	40	10	40	10
	b	60	20	40	20	40	20
	c	90	10	60	10	60	10

‡ Referir-se a Tabela 6 (p.62) (ou Tabela 15 do Anexo) para a descrição das áreas.

Figura 14. . Zonas geradas com a recomendação dos fertilizantes P e K para as áreas PD10PG (1a, 1b, 1c), NT20 (2a, 2b, 2c) e NT10FN (3a, 3b, 3c). Os valores da legenda especificam a taxa de participação dos indivíduos em cada classe.

A recomendação de fertilizantes para a camada de 0,10 – 0,20 m foi maior do que para a camada de 0 – 0,10 m devido a estratificação de P e K no sistema PD (Tabela 9). A recomendação de P e K por hectare (ha), baseada na média das recomendações para as duas camadas, foi similar quando calculada (1) na aplicação uniforme, (2) no gerenciamento localizado. Por outro lado, no sistema PD, estudos suportam a recomendação de fertilizantes baseada na camada de 0 – 0,10 m (Sá, 1999). Neste caso, o uso de fertilizantes por ha seria ligeiramente maior no gerenciamento localizado, porém a distribuição espacial dos fertilizantes dentro da área seria diferente (Figura 14 e Tabela 9).

Tendo em vista a camada superficial de 0 – 0,10 m, somente poucas áreas seriam super-adubadas usando aplicação uniforme (Tabela 11). Por outro lado, a quantidade de áreas sub-adubadas alcançaria maiores proporções: 24 % na área PD10PG (P e K); 27 e 34,% na área PD20 (P e K respectivamente) e 20 e 32,7 % na área PD10FN (P e K respectivamente).

Tabela 11. Estimativa de áreas super e sub-adubadas comparando-se as aplicações de fertilizantes P e K pelo método convencional (cálculo baseado na média) com o gerenciamento localizado.

Área†	Fertilizante	Profundidade m	Áreas super adubadas	Áreas sub- adubadas
PD10PG	P ₂ O ₅	0 – 0.10	9	24
		0.10 – 0.20	7	0
	K ₂ O	0 – 0.10	0	24
		0.10 – 0.20	18	25
	P ₂ O ₅	0 – 0.10	0	27
		0.10 – 0.20	18	0
PD20	K ₂ O	0 – 0.10	0	34
		0.10 – 0.20	22	11
	P ₂ O ₅	0 – 0.10	2	20
		0.10 – 0.20	0	56
PD10FN	K ₂ O	0 – 0.10	0	32
		0.10 – 0.20	18	9

† Referir-se à Tabela 6 (p. 62) ou Tabela 15 do Anexo para descrição das áreas.

Considerando-se a camada de 0,10 – 0,20 m, uma maior porcentagem da área seria super-adubada usando-se a aplicação uniforme (Tabela 11), causando prejuízo ao meio ambiente (Sheppers, 2000).

A avaliação da aplicação do gerenciamento localizado de fertilizantes pode ser feita levando-se em conta (1) o aumento potencial do rendimento de culturas associado à aplicação localizada de fertilizantes em relação à aplicação uniforme, (2) a quantidade de fertilizante super-aplicado. O cálculo do aumento potencial de rendimento assume que áreas com valores de P e K inferiores à média aumentariam o rendimento em proporção à curva de resposta de fertilizantes (Pierce et al., 1995).

Estes cálculos foram feitos para a camada de 0 – 0,10 m da área PD20. De acordo com a curva de resposta de fertilizantes (Comissão de Fertilidade do Solo, RS/SC, 1995), as áreas sub-adubadas com P e K representam um decréscimo potencial de 425 Kg ha⁻¹ e 160 Kg ha⁻¹ de grãos de trigo, respectivamente. Seguindo este raciocínio, enquanto a aplicação de fertilizantes no gerenciamento localizado resultaria em aumento insignificante de custo, o decréscimo potencial de rendimento da cultura de trigo poderia resultar em perda considerável de rentabilidade. Neste caso, a quantidade de adubo aplicado seria praticamente o mesmo porém com diferente distribuição espacial (Figura 14).

4.5.4 Rendimento do trigo

O rendimento do trigo foi medido somente na área PD20 e não apresentou correlação significativa com os atributos topográficos e grande parte dos atributos do solo estudados (Tabela 12). Os atributos melhor correlacionados com o rendimento foram: MO ($r = - 0,45^{**}$), P ($r = - 0,40^{**}$), CTC ($r = - 0,34^{*}$), argila ($r = - 0,37^{*}$), Umidade do grão (UG) ($r = - 0,40^{**}$) e Densidade do solo (Ds) ($r = 0,41^{**}$). Estes resultados foram contrários a nossa expectativa e podem ter sido influenciados pela distribuição das chuvas em 1998 (Figura 11, capítulo 3, p. 47). Pode-se observar que as chuvas neste ano, no período que antecedeu a colheita, foram 122 % superiores a média dos anos anteriores. Historicamente, nesta região, chuvas desta natureza têm afetado a

produtividade do trigo. O impacto da precipitação elevada durante o desenvolvimento e colheita do trigo pode ter escondido, ou mesmo invertido, os efeitos de atributos dos solos. Neste ano agrícola, as propriedades do solo relacionadas com a capacidade de retenção de água foram mais relevantes do que a maioria dos nutrientes analisados para explicar as variações no rendimento do trigo (Tabela 12).

Tabela 12. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre rendimento do trigo e atributos do solo na área PD20.

Atributos	Coef. de correlação (r)
pH	-0.18 ^{ns}
MO	- 0.45**
CTC	- 0.34*
P	- 0.40**
K	- 0.07 ^{ns}
Ca	- 0.21 ^{ns}
Mg	- 0.18 ^{ns}
Argila	- 0.37*
Densidade do solo	0,41**
Umidade do grão de trigo	- 0.48**

Níveis de significância estatística representados por: ns = não significativo, * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

4.5.5 Geoestatística

O teste Shapiro-Wilk (ou a estatística W) de normalidade foi realizado para cada conjunto de dados antes da determinação do semivariograma. Uma transformação logarítmica foi imposta para as variáveis que não apresentaram distribuição normal, o que é um requerimento para o desenvolvimento do semivariograma (Cambardella & Karlen, 1999).

A análise de semivariância revelou diferenças na dependência espacial das propriedades do solo e rendimento do trigo (Tabela 13 e 14; Figuras 15, 16 e 17) que podem ser visualizadas nas Figuras 18 e 19 (como também nas Figuras 20 a 27 do Anexo) através das isolinhas de atributos interpolados por krigagem obtidas com o uso do programa GS+ (Gamma Design software, 1999).

Tabela 13. Parâmetros dos semivariogramas da análise geoestatística da fertilidade do solo nas três áreas de estudo.

Atributos	Prof. (m)	Modelo†	Efeito Pepita	Patamar	Alcance (m)	C/(Co+C) ††	R ² †††
PD10PG‡							
	0 –0.10						
pH		L	0.065	0.297	4092	0.78	0.41
MO*		E	0.009	0.033	1526	0.72	0.60
P*		L	0.184	0.606	1195	0.70	0.35
K		E	1.22	4.29	1964	0.71	0.64
Ca		L	86	265	912	0.68	0.45
Mg*		L	0.047	0.162	839	0.71	0.40
	0.10 –0.20						
pH		L	0.063	0.161	1090	0.61	0.54
MO*		L	0.012	0.064	1011	0.81	0.45
P*		L	0.050	0.345	727	0.85	0.51
K		S	1.101	3.600	2377	0.69	0.24
Ca		L	109	278	1303	0.60	0.38
Mg*		L	0.189	0.471	1342	0.60	0.27
PD20‡							
	0 –0.10						
pH		L	0.047	0.429	543	0.89	0.59
MO		L	0.100	182	848	0.99	0.95
P*		S	0.136	0.421	1723	0.67	0.39
K		E	0.233	1.403	1109	0.83	0.42
Ca		E	79.4	376	1499	0.79	0.55
Mg*		L	0.115	0.496	1056	0.77	0.50
	0.10 –0.20						
pH		L	0.062	0.165	1159	0.62	0.65
MO		E	0.010	24.6	658	1.0	0.89
P*		L	0.233	0.547	5091	0.57	0.18
K		E	0.66	1.98	3747	0.66	0.43
Ca		S	51.4	180.3	1643	0.71	0.53
Mg*		L	0.23	0.601	3853	0.62	0.14
PD10FN‡							
	0 –0.10						
pH		L	0.085	0.199	78080	0.57	0.11
MO*		L	0.002	0.121	678	0.98	0.82
P*		L	0.082	0.357	825	0.77	0.40
K*		L	0.054	0.321	606	0.83	0.84
Ca		L	57.9	285.7	815	0.80	0.73
Mg*		L	0.089	0.365	1237	0.75	0.60
	0.10 –0.20						
pH		L	0.125	0.377	7480	0.67	0.12
MO*		L	0.0001	0.0992	602	0.99	0.91
P*		L	0.089	0.210	1936	0.58	0.20
K*		E	0.066	0.297	7056	0.79	0.44
Ca		L	62	199	1950	0.69	0.41
Mg*		E	0.173	0.608	1668	0.71	0.51

† Modelos: L=Linear, S=Esférico, E=Exponencial; *Transformação logarítmica;

‡ Referir-se à Tabela 6 para descrição das áreas (p.62); †† Proporção de estrutura espacial;

††† Coeficiente de Regressão – fornece uma indicação do quanto o modelo se ajusta aos dados do semivariograma

Figura 15. Semivariogramas de atributos do solo nas profundidades de 0 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m na área PD10PG.

Figure 16. Semivariogramas de atributos do solo nas profundidades de 0 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m na área PD10FN.

Figure 17. Semivariogramas de atributos do solo nas profundidades de 0 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m na área PD20.

Figura 18. Mapas de isolinhas de atributos do solo estimados por krigagem da área PD10FN, na profundidade de 0-0,10 m.
(SB = soma de bases trocáveis).

Figura 19. Mapas de isolinhas dos dados de altitude e densidade do solo (camada de 0-0,10 m) estimados por krigagem da área PD10FN.

Tabela 14 . Sumário estatístico e parâmetros de semivariogramas da análise geoestatística do rendimento do trigo e umidade do grão do trigo por ocasião da colheita na área PD20.

Parâmetros	Rendimento do Trigo (Kg ha ⁻¹)	Umidade do grão (g Kg ⁻¹)
Média	3154	27.6
Desv. Padrão	3402	2.9
Mínimo	2310	21.0
Máximo	3824	40.0
Efeito pepita	50800	1.93
Patamar	259831	26.3
Modelo	L	L
R ²	0.47	0.71
C/Co+C	0.80	0.92

Modelos anisotrópicos lineares foram definidos para a maior parte das variáveis de solos medidas nas três áreas de estudo. Modelos anisotrópicos exponenciais e esféricos definiram as demais variáveis. No modelo esférico a semivariância aumenta

com a distância entre as amostras até um nível constante (patamar) à uma determinada distância (alcance), onde pares de pontos não estão mais auto-correlacionados. O modelo exponencial é similar ao modelo esférico pelo fato de aproximar-se do patamar gradualmente, mas difere deste modelo na taxa pela qual o patamar é alcançado e pelo fato de que o modelo e o patamar nunca realmente convergem. Assume-se que o alcance no modelo exponencial seja o ponto no qual o modelo inclui 95 % do patamar ($C + C_0$). O modelo linear descreve um variograma em linha reta. Portanto, não há patamar neste modelo. Todos os alcances apresentados na Tabela 13 foram calculados pelo programa GS+ e correspondem ao alcance no maior eixo (Gamma Design Software, 1998).

Na área PD10PG o modelo exponencial ajustou-se ao semivariograma calculado razoavelmente bem ($R^2 = 60$ e 64 %) para MO e K na camada $0 - 0,10$ m e a proporção de estrutura espacial ($C/(C_0+C)$) foi $0,72$ e $0,71$ respectivamente (Tabela 13). O modelo linear foi o que melhor se ajustou para pH, Ca, P e Mg. Para pH e Ca a variância total quase se iguala a variância inicial (variância pepita), portanto o modelo linear apresenta uma inclinação próxima de zero (efeito pepita puro). Neste caso, as variáveis não são correlacionadas à distâncias iguais ou maiores que o menor intervalo de distância (Cambardella e Karlen, 1999). Para P e Mg, a semivariância aumenta a medida que a distância entre duas amostras aumenta, logo, neste caso, o modelo linear descreve variáveis que são espacialmente correlacionados em todos os intervalos de distância maiores que o espaçamento da grade de amostragem. Entretanto, o R^2 do modelo ajustado foi $3,5$ e $4,0$ respectivamente e os valores das semivariâncias iniciais (efeito pepita ou *nugget*) foram altos, indicando baixa dependência espacial. Em geral a dependência espacial dos parâmetros analisados foi baixa na camada de $0,10 - 0,20$ m.

Na área PD10FN, com exceção do K e Mg trocável na camada de $0,10 - 0,20$ m, que teve o semivariograma experimental melhor ajustado pelo modelo exponencial, o modelo linear foi o que melhor se ajustou a todas as demais variáveis estudadas. Houve elevada dependência espacial para MO em ambas profundidades e para K e Ca na profundidade de $0 - 0,10$ m, levando-se em consideração os valores dos coeficientes de regressão (R^2) dos modelos ajustados e a proporção de estrutura espacial ($C/(C_0+C)$).

Para a área PD20, a dependência espacial foi relativamente maior na camada de 0 – 0,10 m do que na camada de 0,10 – 0,20 m. A maior dependência espacial foi observada para MO, pH (modelo linear) e Ca (modelo exponencial). O rendimento do trigo apresentou alguma dependência espacial uma vez que a proporção de estrutura espacial foi 0,80, mas o R^2 do modelo linear foi 0,47 (Tabela 14).

Em geral a MO foi a variável que apresentou maior dependência espacial, seguida por K e Ca. Por outro lado, pH e P apresentaram menor dependência espacial. A predominância do modelo linear no ajuste dos semivariogramas sugere que o tamanho das áreas amostradas não foi suficientemente grande para exibir toda a variância espacial.

4.6 CONCLUSÕES

1 - A fertilidade do solo foi altamente variável e muito estratificada nas três áreas estudadas.

2 - A recomendação de fertilizantes seria praticamente a mesma na aplicação uniforme ou no gerenciamento localizado mas a distribuição de fertilizantes dentro das áreas seria espacialmente diferente. A ocorrência de áreas sub-adubadas usando o procedimento uniforme seria de: 24% no PD10PG (P e K), 27 e 34 % no PD20 (P e K respectivamente) e 20 e 33 % na área PD10FN (P e K respectivamente);

3 - As zonas de manejo de fertilizantes criadas pelo programa Fuzme indicaram dependência espacial na demanda de P e K nas três áreas de estudo, mostrando uma tendência de concentração de nutrientes nas posições mais elevadas das vertentes cultivadas no sistema PD;

4 - As propriedades dos solo mostraram diferenças na dependência espacial. Modelos anisotrópicos lineares foram definidos para a maior parte das variáveis medidas nas três áreas. MO foi a variável que apresentou maior dependência espacial, seguida por K e Ca. Por outro lado, pH e P foram as variáveis que apresentaram menor dependência espacial

5 CONCLUSÕES GERAIS

O material de origem dos solos e o relevo são responsáveis por importantes diferenças nas características dos solos da região dos “Campos Gerais” e estão portanto controlando o comportamento de importantes propriedades no manejo das culturas.

O cultivo de solos no sistema plantio direto (PD) por longo período reduziu a acidez potencial, aumentando o pH dos solos. Também foi observado aumento na CTC e elevada correlação da CTC com o conteúdo de matéria orgânica (MO) e saturação por bases, suportando a conclusão de que o sistema PD por longo período possa ser importante prática no aumento da fertilidade dos solos desta região. O aumento da MO, CTC e soma de bases ocorreu principalmente nas posições mais elevadas das vertentes e nas áreas formadas a partir do arenito da formação Furnas e material retrabalhado das formações Furnas e Ponta Grossa, isto é, nas topossequências de solos de textura argilo-arenosa e franco argilo-arenosa.

Os resultados deste estudo indicaram correlações significativas entre os atributos dos solos e topográficos. O uso de equações obtidas através de análises de regressão linear múltipla dos atributos derivados do DEM e atributos dos solos, mostrou-se uma ferramenta útil na geração de modelos de predição de alguns atributos-chave da fertilidade do solo, tais como argila, MO, CTC e densidade do solo, principalmente nos solos formados a partir do arenito Furnas. Este método requer menos amostras de solo do que as técnicas de interpolação, sendo portanto uma promissora alternativa na redução de custos.

A técnica *fuzzy k-means* mostrou-se uma ferramenta útil na geração de zonas de manejo de fertilizantes nas topossequências da região dos Campos Gerais.

A fertilidade do solo foi altamente variável e muito estratificada nas três áreas estudadas. Os teores de MO, Ca e Mg trocáveis aumentaram de acordo com o teor de

argila nas áreas. O pH apresentou valores médios (0 – 0,10 m) e baixos (0,10 – 0,20 m) nas três áreas de estudo mas variou da classe baixa à muito alta. A média dos valores de P enquadrou-se na classe baixa na área NT10PG mas os valores pontuais variaram da classe muito baixa à média. Nas áreas com menor conteúdo de argila (PD10FN e PD20), os valores médios de P alcançaram a classe média, porém variando entre as classes baixa e muito alta. A média dos teores de K foi alta nas três áreas mas os valores variaram da classe baixa a muito alta. Em geral, a maior variabilidade espacial foi observada na área NT20. O rendimento do trigo apresentou variações, porém, neste ano agrícola, houve baixa correlação desta variável com a fertilidade do solo.

A dosagem de fertilizantes recomendada seria praticamente a mesma na aplicação uniforme (convencional) ou no gerenciamento localizado, mas a distribuição de fertilizantes dentro das áreas seria espacialmente diferente. A ocorrência de áreas sub-adubadas usando o procedimento uniforme seria: 24% no NT10PG (P e K), 27% e 34,5% no NT20 (P e K respectivamente) e 20% e 32,7 % na área NT10FN (P e K respectivamente), representando um potencial de decréscimo no rendimento da cultura de trigo.

As propriedades do solo mostraram diferenças na dependência espacial. Modelos anisotrópicos lineares foram definidos para a maior parte das variáveis medidas nas três áreas. MO foi a variável com maior dependência espacial, seguida por K, e Ca. Em geral pH e P apresentaram menor dependência espacial.

ANEXO

Tabela 15. Descrição das variáveis e símbolos .

Símbolos	Descrição/Unidades
pH	(0,01M CaCl ₂)
Ac.P. ou H ⁺	Acidez potencial, mmol _c dm ⁻³
Al ³⁺	Alumínio trocável, mmol _c dm ⁻³
MO	Matéria Orgânica, g dm ⁻³
Ca ²⁺	Ca trocável, mmol _c dm ⁻³
Mg ²⁺	Mg trocável, mmol _c dm ⁻³
K ⁺	K trocável, mmol _c dm ⁻³
P	P disponível, mg dm ⁻³
SO ₄	SO ₄ disponível, mg dm ⁻³
SB	Soma de bases, mmol _c dm ⁻³
CTC	Capacidade de troca de cátions, mmol _c dm ⁻³
Argila	g kg ⁻¹
Silte	g kg ⁻¹
Areia	g kg ⁻¹
Ds ou Dg	Densidade do solo, g cm ⁻³
Rend	Rendimento de grãos de trigo, Kg ha ⁻¹
U.G.	Umidade do grão de trigo por ocasião da colheita (usado como base para transformação do rendimento para Kg ha ⁻¹)
Alt	Altitude, metros
CN	Campo nativo da região dos “Campos Gerais”-PR
PD10PG	Plantio Direto – 10 anos – material de origem: folhelho da formação Ponta Grossa
PD10FN	Plantio Direto – 10 anos – material de origem: arenito da formação Furnas
PD20	Plantio Direto – 20 anos – material de origem: material retrabalhado do arenito Furnas e do folhelho Ponta Grossa
R ²	Coefficiente de regressão – fornece indicação de como o modelo ajusta os dados do semivariograma
C/(C0+C)	Proporção de estrutura espacial
L	Linear
S	Esférico
E	Exponencial
AR	Altitude relativa
EXP	Exposição solar
DECL	Declividade

Tabela 16. Descrição morfológica dos perfis de LV nas diferentes áreas de estudo e posições de vertente.

Prop	Hor †	CN††	PD10PG ‡	Posição na Vertente										PD10FN†††									
				topo	m. enc.*	sopé	topo	m. enc.	sopé	topo	m. enc.	m. enc.	m. enc.	topo	m. enc.	m. enc.	m. enc.						
Espessura	Ap	0-20	0-18	0-20	0-18	0-20	0-16	0-15	0-17	0-20	0-16	0-16	0-17	0-17	0-17	0-19	0-18						
	AB	-26	-27	-29	-23	-24	-23	-24	-25	-29	-25	-25	-26	-26	-30	-27	-29						
	BA	-39	-36	-37	-34	-35	-34	-35	-35	-43	-39	-39	-39	-39	-47	-39	-40						
	Bw1	-82	-85	-83	-80	-78	-80	-72	-72	-80	-76	-76	-72	-72	-83	-90	-92						
	Bw2	-150+	-150+	-150+	-150+	-150+	-150+	-150+	-150+	-150+	-150+	-150+	-150+	-150+	-150+	-150+	-150+						
Cor	Ap	2,5YR2,5/4	2,5YR2,5/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	5YR 3/4	5YR 3/4	5YR 3/4	5YR 3/3	5YR 3/3	5YR 3/3	5YR 3/3	5YR 3/4						
	AB	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	5YR 4/4	5YR 4/4	5YR 4/4	5YR 4/4	5YR 4/4	5YR 4/3	5YR 3/4	5YR 3/4						
	BA	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/4	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 4/4	5YR 4/4						
	Bw1	10R 3/6	10R 3/6	10R 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 4/6	2,5YR 4/6						
	Bw2	10R 3/6	10R 3/6	10R 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/6	2,5YR 4/6	2,5YR 4/6	2,5YR 4/6	2,5YR 4/6	2,5YR 4/6	2,5YR 4/6	2,5YR 4/6	2,5YR 4/6						
Textura†††	Ap	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg						
	AB	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg						
	BA	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg						
	Bw1	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg						
	Bw2	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg	m. arg						
Consistência††††	Ap	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	Fv/ m. fv	Fv/ m. fv						
	AB	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	Fv/ m. fv	Fv/ m. fv						
	BA	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	Fv/ m. fv	Fv/ m. fv						
	Bw1	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	Fv/ m. fv	Fv/ m. fv						
	Bw2	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	fríavel	Fv/ m. fv	Fv/ m. fv						
Estrutura†††††	Ap	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr						
	AB	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr						
	BA	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr						
	Bw1	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr						
	Bw2	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr	ft mp gr						

†Horizon tes †† Campo Nativo, ‡ Plantio Direto -10 anos (folhelho Ponta Grossa como material de origem), †† Plantio Direto -20 anos (material retrabalhado do folhelho Ponta Grossa e do arenito Furnas como material de origem), ††† Plantio Direto -10 anos (arenito Furnas como material de origem); * meia encosta
 ††† m. arg. (muito argilosa) arg (argila), arg aren (argilo-arenosa), Fr. arg. ar (franco argilo-arenosa)
 †††† Fv/m. Fv (fríavel à muito fríavel); ††††† ft mp gr (forte, muito pequena, granular), Md/ft pq gr (moderada à forte, pequena, granular),
 Md pq gr (moderada, pequena, granular).

Quadro 17. Propriedades Físicas e Mineralógicas dos perfis de LV nas diferentes áreas de estudo e posições na vertente.

Propriedade	Hor [†]	CN ^{††}	PD10PG [‡]						PD20 ^{††}						PD10FN ^{†††}					
			Posição na vertente						Posição na vertente						Posição na vertente					
Análises Físicas		topo	m. enc*	sopé	topo	m. enc	sopé	topo	m. enc	sopé	topo	m. enc	sopé	topo	m. enc	sopé	topo	m. enc	sopé	
Argila, g dm ⁻³ ,	Ap	70	71	65	68	68	64	48	38	42	32	24	22							
	AB	77	71	68	68	68	66	48	38	42	38	28	24							
	BA	80	69	66	70	70	70	50	42	44	42	30	32							
	Bw1	82	78	69	72	74	74	54	46	50	46	34	32							
Silte, g dm ⁻³ ,	Bw2	-	-	-	72	74	74	54	46	50	46	38	32							
	Ap	10	13	12	12	12	14	8	8	6	8	6	6							
	AB	10	13	12	12	12	12	8	8	6	6	6	8							
	BA	10	10	12	14	12	14	8	4	8	6	8	6							
Areia, g dm ⁻³ ,	Bw1	12	10	10	12	8	10	8	4	8	4	8	4							
	Bw2	-	-	-	12	8	8	8	6	8	6	6	6							
	Ap	20	16	23	20	20	22	44	54	52	60	70	72							
	AB	13	16	20	20	20	22	44	54	52	56	66	68							
Densidade do solo, g cm ⁻³	BA	10	21	22	18	18	16	42	54	48	52	62	62							
	Bw1	6	12	21	16	18	16	38	50	42	50	58	64							
	Bw2				16	18	18	38	48	42	48	56	62							
	Ap	1,07	-	-	1,12	1,16	1,01	1,35	1,33	1,45	1,55	1,67	1,72							
Análises Mineralógicas	AB	0,91	-	-	1,12	1,15	1,17	1,25	1,42	1,33	1,44	1,66	1,61							
	BA	0,96	-	-	1,13	1,20	1,23	1,26	1,38	1,26	1,40	1,62	1,53							
	Bw1	0,87	-	-	1,13	1,09	1,01	1,14	1,33	1,30	1,30	1,48	1,58							
	Bw2	-	-	-	1,13	1,01	0,93	1,16	1,22	1,25	1,39	1,41	1,56							
Fração argila	Bw1	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al	Cao, Gb, Hm, Gt, Vm-Al							
	Ap ...Cao	24,4	13,1	11,9	15,8	23,7	21,9	11,6	17,5	14,5	15,3	13,2	16,5							
	.Gb	16,4	21,1	13,7	36,0	26,3	29,0	45,5	35,6	40,1	37,8	40,0	31,3							
	Bw1 ..Cao	25,8	14,9	16,4	17,4	20,4	23,9	10,6	16,1	13,0	14,5	13,1	16,3							
ATD ^{†††} , %	... Gb	20,3	21,8	14,9	40,6	32,7	30,5	42,4	33,4	39,8	35,9	32,5	32,6							

[†]Horizontes ^{††} Campo Nativo, [‡] Plantio Direto -10 anos (folhelho Ponta Grossa como material de origem), ^{†††} Plantio Direto -20 anos (material retrabalhado do folhelho Ponta Grossa e do arenito Furnas como material de origem), ^{††††} Plantio Direto -10 anos (arenito Furnas como material de origem); * meia encosta, ^{†††††} horizontes não amostrados. Cao = caolinita, Gb = gibbsita, Hm = hematita, Gt = goetita, Vm-Al = vermiculita aluminizada, ^{†††††} Análise termo diferencial.

Tabela 18. Propriedades Químicas dos perfis de Latossolos Vermelho nas diferentes áreas e posições da vertente.

Propriedades	Hor†	Campo Nativo			PD10PG			PD20		PD10FN			
		Posição na vertente											
		Topo	Meia enc.*	Sopé	topo	Meia enc.	sopé	topo	Meia enc.	Meia enc.	topo	Meia enc.	Meia enc.
pH	Ap	3,9	3,7	3,6	4,8	4,9	4,6	4,8	5,3	4,6	4,8	5,5	5,3
	AB	3,7	3,6	3,5	4,2	4,4	4,0	4,2	4,1	4,1	4,6	4,8	4,2
	BA	3,7	3,6	3,5	4,3	4,2	4,1	4,2	4,2	4,2	4,0	4,2	4,1
	Bw1	3,9	3,7	3,7	4,5	4,4	4,1	4,5	4,2	4,2	4,4	4,4	4,2
	Bw2	-**	-	-	4,7	4,6	4,4	4,6	4,5	4,4	4,3	4,8	4,2
Ac.P., mmol _c dm ⁻³	Ap	166	228	228	64	58	88	58	38	72	42	25	28
	AB	166	205	253	80	88	150	88	88	88	58	38	58
	BA	135	253	228	88	98	109	80	64	72	80	42	52
	Bw1	98	185	185	52	58	98	52	52	64	52	34	38
	Bw2	-	-	-	42	47	58	47	38	42	42	28	42
Al trocável, mmol _c dm ⁻³	Ap	14	20	24	0	0	2	2	0	3	0	0	0
	AB	16	20	23	5	2	14	4	8	7	2	0	3
	BA	13	25	28	6	6	12	5	8	8	8	4	8
	Bw1	10	20	26	3	4	10	3	4	4	3	3	4
	Bw2	-	-	-	2	2	3	3	3	3	4	0	4
MO g dm ⁻³ ,	Ap	47	45	45	29	31	39	33	35	29	30	24	20
	AB	32	47	36	25	31	24	21	19	20	20	15	15
	BA	28	37	33	25	24	27	19	18	17	15	9	13
	Bw1	18	23	25	13	20	16	13	14	16	11	9	8
	Bw2	-	-	-	9	11	10	12	10	10	11	7	8
Ca trocável, mmol _c dm ⁻³ ,	Ap	9	9	9	49	55	60	56	58	36	40	44	34
	AB	1	8	6	15	21	13	12	11	11	23	11	9
	BA	1	4	3	6	10	8	10	6	6	4	3	4
	Bw1	1	1	1	3	7	2	7	4	6	2	2	2
	Bw2	-	-	-	2	2	1	2	2	1	1	3	1
Mg trocável, mmol _c dm ⁻³ ,	Ap	9	11	8	22	26	14	19	25	11	15	17	13
	AB	2	8	6	9	15	6	6	4	4	14	7	5
	BA	1	5	3	5	8	5	5	3	3	3	3	2
	Bw1	1	1	1	1	6	2	4	3	3	4	3	1
	Bw2	-	-	-	1	2	1	2	3	1	1	2	1
K trocável, mmol _c dm ⁻³ ,	Ap	3,4	4,4	2,6	4,5	1,8	2,0	4,7	2,6	1,3	3,3	3,5	3,4
	AB	1,6	3,0	2,6	2,2	2,0	1,9	2	1,9	0,5	2,2	2,1	2,4
	BA	1,3	2,5	1,8	1,4	1,2	1,5	1,7	2,2	0,7	1,2	1,8	2
	Bw1	0,6	1,1	1,2	0,3	0,4	0,6	0,8	2,6	0,5	0,5	1,5	1,1
	Bw2	-	-	-	0,2	0,2	0,2	0,9	1,7	0,2	0,2	0,5	0,2
P disponível, mg dm ⁻³	Ap	6	6	6	8	11	18	51	43	21	21	35	16
	AB	3	5	6	4	5	7	3	5	4	5	4	4
	BA	3	4	4	2	3	3	2	2	3	2	2	3
	Bw1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
	Bw2	-	-	-	1	2	1	2	2	2	2	2	2
Soma de Bases, mmol _c dm ⁻³	Ap	21,4	24,4	19,6	75,5	82,8	76	79,7	85,6	48,3	58,3	64,5	50,4
	AB	4,6	19,0	14,6	26,2	38,0	20,9	20,0	16,9	15,5	39,2	20,1	16,4
	BA	3,3	11,5	7,8	12,4	19,2	14,5	16,7	11,2	9,7	8,2	7,8	8
	Bw1	2,6	3,1	3,2	4,3	13,4	4,6	11,8	9,6	9,5	6,5	6,5	4,1
	Bw2	-	-	-	3,2	4,2	2,2	4,9	6,7	2,2	2,2	5,5	2,2
CTC, mmol _c dm ⁻³	Ap	187	252	248	140	141	164	138	124	120	100,3	89,5	78,4
	AB	171	224	268	106	126	171	108	105	104	97,2	58,1	74,4
	BA	138	265	236	100	117	124	97	75	82	88,2	49,8	60
	Bw1	101	188	188	56	71	103	64	62	74	58,5	40,5	42,2
	Bw2	-	-	-	45	51	60	52	45	44	44,2	33,5	44,2
SiO ₂ , g kg ⁻¹	Bw1	160	171	155	145	123	160	68	70	72	75	51	61
Al ₂ O ₃ , g kg ⁻¹	Bw1	226	238	218	283	268	282	201	173	190	177	142	112
Fe ₂ O ₃ , g kg ⁻¹	Bw1	170	112	86	150	204	153	83	58	68	66	47	35
TiO ₂ , g kg ⁻¹	Bw1	19,0	15,3	9,6	13,9	17,2	15,3	7,4	6,8	7,7	7,0	5,4	4,7
MnO, g kg ⁻¹	Bw1	0,6	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Ki	Bw1	1,20	1,22	1,21	0,87	0,78	0,97	0,58	0,69	0,65	0,72	0,61	0,92
Kr	Bw1	0,81	0,94	0,96	0,65	0,52	0,72	0,45	0,57	0,52	0,58	0,50	0,77

[†] Horizontes, * meia encosta, ** horizonte não amostrado. Referir-se à Tabela 15 para descrição das áreas e unidades.

Tabela 19a. Sumário estatístico das variáveis amostradas na grade (N = 55) na profundidade de 0-0,10 m nas 4 áreas de estudo.

Atributos	Valor Mínimo				Valor Máximo				Média				Desvio Padrão				Variancia			
	PD10		PD20		PD10		PD20		PD10		PD20		PD10		PD20		PD10		PD20	
	CN	PG	FN	CN	PG	FN	CN	PG	CN	PG	FN	CN	PG	FN	CN	PG	CN	PG	FN	CN
pH	3,4	4,6	4,4	4,4	5,9	6,5	3,7	5,1	5,2	5,0	0,09	0,27	0,4	0,29	0,01	0,07	0,19	0,08	0,08	0,08
MO	33,0	31,0	21,0	18,0	49,0	49,0	47,4	38,9	34,2	25,5	4,20	4,87	6,49	5,15	17,70	23,7	42,2	26,59	26,59	26,59
P	3,0	4,0	8,0	7,0	27,0	40,0	46,0	5,6	10,52	23,41	1,21	4,71	8,9	7,84	1,46	22,25	79,32	61,46	61,46	61,46
K	1,4	1,2	1,3	1,4	5,0	5,2	6,7	2,8	3,85	3,21	0,78	1,44	0,8	1,27	0,60	2,08	0,65	1,62	1,62	1,62
Ca	2,0	30,0	21,0	17,0	15,0	85,0	61,0	9,4	52,38	44,0	33,8	2,45	11,1	13,45	10,39	6,02	123,2	181,1	108,04	108,04
Mg	2,0	12,0	7,0	7,0	51,0	41,0	31,0	8,5	23,67	17,4	14,2	6,82	7,72	5,20	6,09	46,55	59,65	27,03	27,03	27,03
Al	10,0	0,0	0,0	0,0	3,0	6,0	4,0	21,1	0,24	0,34	0,5	4,74	0,74	0,86	22,47	0,55	1,0	0,74	0,74	0,74
Ac.P.	15,0	20,0	15,0	20,0	28,1	64,0	80,0	21,7	40,73	33,9	36,4	28,2	10,20	11,2	796,7	104,0	124,9	149,54	149,54	149,54
SO ₄	3,0	2,0	3,0	2,0	16,0	11,0	7,0	6,2	5,7	4,1	1,63	2,72	1,7	1,20	2,65	7,45	2,91	1,44	1,44	1,44
SB	5,4	45,7	32,1	26,3	33,0	143,5	125,8	20,7	79,9	65,1	51,4	5,17	17,42	20,89	16,10	26,72	303,5	436,5	259,38	259,38
CTC	169,5	95,3	70,6	66,1	294,3	171,5	141,8	238	120,6	99,1	87,8	27,9	12,84	14,3	16,95	782,3	164,9	205,5	287,34	287,34
Argila	63,0	60,0	32	20,0	79,0	74,0	38,0	71,0	65,4	40,8	27,8	4,08	4,22	5,65	16,70	17,8	31,9	30,47	30,47	30,47
Silte	10	8,0	2	4,0	23	16,0	10,0	14,3	10,4	4,65	5,8	2,70	2,06	1,44	1,23	7,32	4,2	2,08	1,52	1,52
Areia	7,0	16,0	44	56,0	25,0	32,0	76,0	14,0	24,0	54,5	66,4	5,30	5,3	5,7	28,90	28,1	32,6	32,5	32,5	32,5
Ds	0,84	1,04	1,23	1,29	1,21	1,33	1,68	1,02	1,19	1,44	1,5	0,09	0,07	0,10	0,08	0,01	0,004	0,01	0,01	0,01
Rend.	-	2426	2310	-	-	4070	3824	-	3186	3154	-	-	296,5	3402	-	87877	11576	-	-	-
Altitude	817,0	784,9	862	886	850,2	813,8	889	912	835	801,3	876	9,15	7,64	7,2	7,4	83,70	58,4	52,6	55,5	55,5

Tabela 19b. Sumário estatístico das variáveis amostradas na grade (N = 55) na profundidade de 0,10-0,20 m nas 4 áreas de estudo†.

Atributo	Valor Mínimo				Valor Máximo				Média				Desvio Padrão				Variancia			
	PD10		PD20		PD10		PD20		PD10		PD20		PD10		PD20		PD10		PD20	
	CN	PG	FN	CN	PG	FN	CN	PG	CN	PG	FN	CN	PG	FN	CN	PG	CN	PG	FN	CN
pH	3,5	4,2	4,1	4,0	3,9	5,4	6,0	3,6	4,6	4,5	4,5	0,1	0,3	0,3	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
MO	25	19	15	13	53	39	29	40	30,1	22,5	19	5,8	4,3	3,5	3,5	18,3	33,6	18,3	12,1	12,0
P	2,0	2,0	2	4,0	8,0	19	19	4,0	4,7	5,0	6,7	0,9	2,4	3,1	2,3	0,8	5,6	9,8	5,1	5,1
K	0,9	0,9	1,2	1,0	5,0	8,8	5,4	1,6	2,3	2,5	2,3	0,4	1,2	0,9	0,6	0,2	1,4	0,8	0,4	0,4
Ca	1,0	12	7,0	5,0	15,0	58	59	2,9	28,7	18,9	15,5	1,4	11,5	8,7	8,5	2,1	133,2	76,1	72,7	72,7
Mg	1,0	7	2,0	2,0	16,0	48	38	2,7	20,6	8,6	8,9	1,2	10,1	5,3	4,4	1,4	102,5	28,2	19,2	19,2
Al	15	0,0	0,0	0,0	31	20	16	10,0	5,1	6,3	2,9	4,2	5,3	4,2	2,6	17,4	27,6	17,7	7,0	7,0
Ac.P.	135	31	31	2,2	281	121	80	88	61,8	53,7	45,7	34,6	17,1	10,4	15,0	1194	294	109	225,2	225,2
SO ₄	2,0	3,0	2,0	4,0	10,0	52	31	17,0	16,4	15,1	9,1	1,1	10	6,1	3,1	1,2	101,4	37,5	9,6	9,6
SB	3,3	20,7	10,7	10,4	33,0	101	99	70,5	51,6	30	26,8	2,7	21,4	13,8	12,7	7,5	458,7	191	162,5	162,5
CTC	139	84,3	53,6	53,6	294	153,2	157	101,5	113,3	84	72,5	34,7	14,1	16,0	12,7	1206	119,5	256	161,5	161,5
Argila	62	54	30	22	84	74	54	38	64	44	28	5,4	5,5	6,2	4,8	29,0	30,6	38,5	22,8	22,8
Silte	2	8	2	4	15	16	8	16	12	6	6	2,1	1,8	1,6	1,9	4,3	3,2	2,6	3,5	3,5
Areia	3	14	38	56	30	32	62	72	24	50	65	5,6	5,7	6,1	5,4	31,6	32,7	37,6	29,8	29,8
Ds	0,83	0,83	1,25	1,38	1,15	1,15	1,65	1,68	1,0	1,41	1,52	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

† Referir-se à Tabela 15 para descrição das áreas e unidades. SB = soma de bases, Ds = densidade do solo, Ac.P. = acidez potencial

Figura 20a. Mapas de isolinhas de atributos do solo interpolados por krigagem da área de campo nativo (CN), na profundidade de 0-0,10 m. Referir-se à Tabela 15 para descrição da área e unidades.

Figura 20b. Mapas de isolinhas de atributos do solo e altitude interpolados por krigagem da área de campo nativo (CN), na profundidade de 0-0,10 m. Referir-se à Tabela 15 para descrição da área e das unidades.

Figura 21a. Mapas de atributos do solo interpolados por krigagem da área de campo nativo (CN), na profundidade de 0,10-0,20 m. Referir-se à Tabela 15 para descrição da área e das unidades.

Figura 21b. Mapas de atributos do solo e altitude interpolados por krigagem da área de campo nativo (CN), na profundidade de 0,10-0,20 m. Referir-se à Tabela 15 para descrição da área e das unidades. (cont.)

Figura 22a. Mapas de atributos do solo interpolados por krigagem da área PD10PG, na profundidade de 0-0,10 m. Referir-se à Tabela 15 para descrição da área e das unidades.

Figura 22b. Mapas de isolinhas de atributos do solo, plantas e altitude interpolados por krigagem da área PD10PG, na profundidade de 0-0,10 m. Referir-se à Tabela 15 para descrição da área e das unidades (cont.).

Figura 23a. Mapas de atributos do solo interpolados por krigagem da área PD10PG, na profundidade de 0,10-0,20 m. Referir-se à Tabela 15 para descrição da área e das unidades.

Figura 23b. Mapas de atributos do solo interpolados por krigagem da área PD10PG, na profundidade de 0,10-0,20 m. Referir-se à Tabela 15 para descrição da área e das unidades. (cont.)

Figura 24a. Mapas de atributos do solo interpolados por krigagem da área PD20, na profundidade de 0-0,10 m. Referir-se à Tabela 15 para descrição da área e das unidades.

Figura 24b. Mapa de isolinhas de atributos do solo, plantas e altitude, interpolados por krigagem, da área PD20 na profundidade de 0-0,10 m. (cont.)

Figura 25a. Mapas de atributos do solo interpolados por krigagem da área PD20, na profundidade de 0,10-0,20 m. Referir-se à Tabela 15 para descrição da área e das unidades.

Figura 25b. Mapas de atributos do solo interpolados por krigagem da área PD20, na profundidade de 0,10-0,20 m. Referir-se à Tabela 15 para descrição da área e das unidades. (cont.)

Figura 26a. Mapas de atributos do solo interpolados por krigagem da área PD10FN, na profundidade de 0-0,10 m. Referir-se à Tabela 15 para descrição da área e das unidades.

Figura 26b. Mapas de atributos do solo interpolados por krigagem da área PD10FN, na profundidade de 0-0,10 m. Referir-se Tabela 15 para descrição da área e das unidades. (cont.)

Figura 27. Mapas de atributos do solo interpolados por krigagem da área PD10FN, na profundidade de 0,10-0,20 m. Referir-se à Tabela 15 para descrição da área e das unidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDISCOTT, T.M.; WAGENET, R.J. Concepts of solute leaching in soils: a review of modelling approaches. **Journal of Soil Science**, v.36, p.411-424, 1985.
- AUERNHAMMER, H.; DEMMEL, M.; MUHR, T.; ROTTMEIER, J.; WILD, K. GPS for yield mapping on combines. **Computers and Eletronics in Agriculture**, v.11, p.54-68, 1994.
- AUSTRALIAN CENTER FOR PRECISION AGRICULTURE. **Fuzme, Fuzzy k-Means with Extragrades**. Sidney, 1999.
- BHATTI, A.U.; MULLA, D.J.; FRAZIER, B.E. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. **Remote Sensing Environmental**, v.37, p.181-191, 1991.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. pt.1: Physical and mineralogical methods, p.364-367. (Agronomy, 9).
- BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isorithmic mapping of soil properties. The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, v.33, p.315-331, 1980.
- BURROUGH, P.A. Fuzzy mathematic methods for soil survey and land evaluation. **Journal of Soil Science**, v.40, p.447-492, 1989.

BURROUGH, P.A. Soil variability: a late 20th century view. **Soils and Fertilizers**, v.56, p.529-562, 1993.

BURROUGH, P.A.; BOUMA, J.; YATES, S.R. The state of the art in pedometrics. **Geoderma**, v.62, p.311-326, 1994.

BURROUGH, P.A.; MCDONNELL, R.A. **Principles of Geographical Information Systems**. New York: Oxford University Press, 1998, 333p.

BURROUGH, P.A.; VAN GANNS, P.F.M; HOOTSMANS, R. Continuous classification in soil survey: spatial correlation, confusion and boundaries. **Geoderma**, v.77, p.115-135, 1997.

BRUIN, S. de; STEIN, A. Soil-landscape modeling using fuzzy c-means clustering of attribute data derived from a digital elevation model (DEM). **Geoderma**, v.83, p.17-33, 1998.

CAHN, M.D.; HUMMEL, J.W.; BROUER, B. H. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1240-1248, 1994.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994.

CAMBARDELLA, C.A.; KARLEN, D.L. Spatial Analysis of soil fertility parameters. **Precision Agriculture**, v.1, p.5-14, 1999.

CIHA, A.J. Slope position and grain yield of soft white winter wheat. **Agronomy Journal**, v.76, p.193-196, 1984.

COMISSAO DE FERTILIDADE DO SOLO-RS/SC. **Recomendações de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3.ed. Passo Fundo, SBCS – Nucleo Regional Sul, 1995. 224p.

CONACHER, A.J.; DALRYMPLE, J.B. The nine unit landsurface model: An approach to pedogeomorphic research. **Geoderma**, v.18, p.1-154, 1977.

CORA, J.E. The potential for site-specific management of soil and corn yield variability induced by tillage. East Lansing, 1997. 104p. Thesis (Ph D.) - Michigan State University.

CHRISTOPHERSEN, N.; NEAL, C. Linking hydrological, geochemical, and soil chemical process on the catchment scale: An interplay between modeling and field work. **Water Resources Research**, v.26, p.3077-3086, 1990.

CLINE, M.G. Basic principles of soil classification. **Soil Science**, v.67, p.81-91, 1949.

CLINE, M.G. The changing model of soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.25, p.442-446, 1961.

DANIELS, R.B.; GAMBLE, E.E. Relations between stratigraphy, geomorphology and soils in costal plain areas of southeastern U.S.A. **Geoderma**, v.21, p.41-65, 1978.

DANIEL, R.B.; GILLIAM, J.W.; KASSEL, D.K.; NELSON, L.A. Soil erosion class and landscape position in North Carolina Piedmont. **Soil Science Society of America Journal**, v.49, p.991-995, 1985.

DAVIES, B.E.; GAMM, S.A. Trend surface analysis applied to soil reaction values. **Geoderma**, v.3, p.223-231, 1970.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; ROTH, C.H. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.8, p.253-263, 1986.

DIKAU, R. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: RAPER, J. (Ed.) **Three-dimensional applications in geographic information systems**. New York: Taylor and Francis, 1989. p.51-77.

DOBERMANN, A.; OBERTHUR, T. Fuzzy mapping of soil fertility – a case study on irrigated riceland in the Philippines. **Geoderma**, v.77, p.317-339, 1997.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.

ENTZ, T.; CHANG, C. Evaluation of soil sampling schemes for geostatistical analyses: A case study for soil bulk density. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 71, p.165-176, 1991.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **Arc View GIS**, version 3.2, Michigan, 1999

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. Evolução da área de plantio direto no Brasil. <http://www.agri.com.br/febrapdp/pd>, (25 ago. 2000).

FITZPATRICK, E.A. **Soil Horizon Designation and classification**. Wageningen: International Soil Reference and Information Center, 1988. 1v.

FREISSINET, C.; ERLICH, M.; VAUCLIN, M. A fuzzy logic-based approach to assess imprecision of soil water contamination modeling. **Soil & Tillage Research**, v.47, p.11-17, 1998.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. **GS+ - Professional geostatistics for the environmental sciences**, version 3.1.7. Plainwell, 1998.

GOERING, C.E. Recycling a concept. **Agricultural Engineering**, Nov., p. 25, 1993.

GOLDEN SOFTWARE INCORPORATION. **Surfer – Surface Mapping System**, version 7.0, Golden, 1999.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York : Oxford University Press, 1997, 483p.

GRUIJTER, J.J. de; WALVOORT, D.J.J.; VAN GAANS, P.F.M. Continuous soil maps – a fuzzy set approach to bridge the gap between aggregation levels of process and distribution models. **Geoderma**, v.77, p.169-195, 1997.

HALL, G.F.; OLSON, C.G. Predicting variability of soils from landscape models. In: **SPATIAL VARIABILITY OF SOILS AND LANDFORMS**. Madison, 1991. **Proceedings**. Madison: Soil Science Society of America, 1991, p.9-24.

- HAIRSTON, A. B.; GRIGAL, D. F. Topographic influences on soils and trees within single mapping units on a sandy outwash landscape. **Forest Ecology Management** v.43, p.35-45, 1991.
- HANNA, A.Y.; HARLAN, P.W.; LEWIS, D.T. Soil available water as influenced by landscape position and aspect. **Agronomy Journal**, v.74, p.999-1004, 1982.
- HOLZHEY, S. Soil resources variability: Working group report. In: SOIL SPECIFIC CROP MANAGEMENT: A workshop on research and development issues. Madison, 1992. **Proceedings**. Madison: American Society of Agronomy, 1993, p.69-75.
- HOOSBEEK, M.R.; BRYANT, R.B. Towards the quantitative modeling of pedogenesis – a review. **Geoderma**, v.55, p.183-210, 1992.
- HUGGETT, R.J. Soil landscapes systems: A model of soil genesis. **Geoderma**, v.13, p.1-22, 1975.
- IRVIN B.J.; VENTURA, S.J.; SLATER, B.K. Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin. **Geoderma**, v.77, p.137-154, 1997.
- JACKSON, M.L. **Soil chemical analysis: Advanced course**. 2. ed. Madison: M.L. Jackson, 1969, 895p.
- JEFFREY, L.S.; HALVORSON, J.J.; PAPENDICK, R.I. Using multiple-variable indicator Kriging for evaluating soil quality. **Soil Science Society of America Journal** , v.57, p.743-749, 1993.

JENNY, H. **Factors of Soil Formation – A system of Quantitative Pedology**. New York: McGraw-Hill, 1941. 281p.

JENNY, H. **The Soil Resource. Origin and Behavior**. New York: Springer-Verlag, 1980. 1v.

JOHNSON, W.M. The pedon and the polypedon. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.27, p. 212-215, 1963.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, C.J. **Mining geostatistics**. London: Academic Press, 1978. 1v.

KELLOGGS, C. E. **Soil interpretation in the soil survey**. Washington: USDA-Soil Conservation Service, 1961. 97p.

KINSELLA, J. Improving soil, water and air quality with no-tillage. In: Congresso Nacional de AAPRESID, 5., Mar del Plata, 1997. **Anais**. AAPRESID, p.91-93.

KIRKBY, M.J. A basis for soil profile modeling in a geomorphic context. **Journal of Soil Science**, v.36, p.97-121, 1985.

KNOX, E.G. Soil individual and soil classification. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.29, p.79-84, 1965.

KUILENBURG, J. van; GRUIJTER, J.J.de; MARSMAN, B.A.; BOUMA, J. Accuracy of spatial interpolation between point data on soil moisture supply capacity, compared with estimates from mapping units. **Geoderma**, v.27, p.311-325, 1982.

- LAGACHERIE, P.; CAZEMIER, D.R.; VAN GANNS, P.F.M.; BURROUGH, P.A.
Fuzzy k-means clustering of fields in an elementary catchment and extrapolation to a larger area. **Geoderma**, v.77, p.197-216, 1997.
- LARK, R.M. Soil-landscape relationships at within-field scales: an investigation using continuous classification. **Geoderma**, v.92, p.141-165, 1999.
- LEMOS, R.C. de, SANTOS, R.D. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3.ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 83p.
- LEPSCH, I.F.; BUOL, S.W.; DANIELS, R.B. Soil landscape relationship in Occidental Plateau of São Paulo State, Brazil: I. Geomorphic Surfaces and Soil Mapping Units. **Soil Science Society of America Journal**, v.41, p.104-109, 1977.
- MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. 2 ed. Rio de Janeiro: Livraria Jose Olímpio Editora, 1981. 442p.
- MALLARINO, A.P.; OYARZABAL, E.S.; HINZ, P.N. Interpreting within-field relationships between crop yields and soil and plant variables using factor analysis. **Precision Agriculture**, v.1, p.15-25. 1999.
- McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. V. Coregionalization and multiple sampling strategy. **Soil Science Society of America Journal**, v.34, p.137-162, 1981.
- McBRACNEY, A.B.; GRUIJTER, J.J. de. A continuum approach to soil classification by modified fuzzy K-means with extragrades. **Journal of Soil Science**, v.43, p.159-175, 1992.

- McBRATNEY, A.B.; GRUIJTER, J.J. de; BRUS, D.J. Spatial prediction and mapping of continuous soil classes. **Geoderma**, v.54, p.39-64, 1992.
- McBRATNEY, A.B.; PRINGLE, M.J. Spatial variability in soil-implications for precision agriculture. In: PRECISION AGRICULTURE'97: Spatial Variability in Soil and Crop. Oxford, 1997. **Proceedings**. Oxford: BIOS Scientific Publishers, 1997. v.1, p.3-31.
- McBRATNEY, A.B.; ODEH, I.O.A. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. **Geoderma**, v.77, p.85-113, 1997.
- MACKENZIE, N.J.; RYAN, P.J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. **Geoderma**, v.89, p.67-94, 1999.
- McSWEENEY, K.; GESSLER, P.E.; SLATER, B.K.; HAMMER, R.D.; BELL, J.; PETERSEN, G.W. Towards a new framework for modeling the soil landscape continuum. In: AMUNDSON, R., SINGER, M., HARDIN, J. (Eds.) **Factors of Soil Formation: A Fiftieth Anniversary Retrospective**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p.127-145. (Special Publication 33).
- MILLER, M.P.; SINGER, M.J.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. **Soil Science Society of America Journal**, v.52, p.1133-1141, 1988.
- MILNE, G. Some suggested units of classification and mapping particular for East African Soils. **Soil Research**. v.4, n.3, 1935.
- MONDARDO, A. Resultados de pesquisa. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO. Passo Fundo, 1978. **Anais**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNP Trigo, 1978, p.249-252.

- MOORE, I.D.; GRAYSON, R.B.; LADSON, A.R. Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications. **Hydrology Processes**, v.5, p.3-30, 1991.
- MOORE, I.D.; GESSLER, P.E.; NIELSEN, G.A.; PETERSON, G.A. Soil Attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.443-452, 1993a.
- MOORE, I.D.; GESSLER, P.E.; NIELSEN, G.A.; PETERSON, G.A. Terrain analysis for soil specific crop management. In: SOIL SPECIFIC CROP MANAGEMENT: A workshop on research and development issues. Madison, 1992. **Proceedings**. Madison: American Society of Agronomy, 1993. p.27-55.
- MOORE, G.A.; TYNDALE-BISCOE, J.P. Estimation of the importance of spatially variable nitrogen application and soil moisture holding capacity to wheat productions. **Precision Agriculture**, v.1, p.27-38, 1999.
- MULLA, D.J.; BHATTI, A.U; HAMMOND, M.W; BENSON, J.A. A comparison of winter wheat yield and quality under uniform versus spatially variable fertilizer management. **Agriculture Ecosystem Environmental** v.38, p.301-311, 1992.
- MULLA, D.J.; SCHEPERS, J.S. Key processes and properties for site-specific soil and crop management. In: PIERCE, F.J.; SADLER, E.J. (Eds.) **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA Misc. Publ. ASA, CSSA, SSSA, 1997, p.1-18.
- NIELSEN, D.R.; ALEMI, M.H. Statistical opportunities for analyzing spatial and temporal heterogeneity of field soils. **Plant and Soil**, v.115, p.285-296, 1989.

- NIELSEN, D.R.; WENDROTH, O.; PARLANGE, M.B. Opportunities for examining on-farm soil variability. In: SITE-SPECIFIC MANAGEMENT FOR AGRICULTURAL SYSTEMS. Minneapolis, 1994. **Proceedings**. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1995. p.95-131.
- ODEH, I. O. A.; CHITTLEBOROUGH, D. J.; MCBRATNEY, A. B. Elucidation of soil-landform interrelationships by canonical ordination analysis. **Geoderma**, v.49, p.1-32, 1991.
- ODEH, I.O.A.; MCBRATNEY, A.B.; CHITTLEBOROUGH, D.J. Soil pattern recognition with fuzzy c-means: Application to classification and soil-landform interrelationships. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.506-516, 1992.
- ODEH, I.O.A.; MCBRATNEY, A.B.; CHITTLEBOROUGH, D.J. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. **Geoderma**, v.63, p.197-214, 1994
- OVALLES, F.A.; COLLINS, M.E. Soil-landscape relationship and soil variability in north central Florida. **Soil Science Society of America Journal** , v.50, p.401-408, 1986.
- PENNOCK, D.J.; ZEBARTH, B. J.; DEJONG, E. Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. **Geoderma**, v.40, p.297-315, 1987.
- PIERCE, F.J.; WARNCKE, D.D.; EVERETT, M.W. Yield and Nutrient Variability in Glacial Soils of Michigan. In: SITE-SPECIFIC MANAGEMENT FOR AGRICULTURAL SYSTEMS. Minneapolis, 1994. **Proceedings**. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1995. p.133-151.

RAIJ, B. van. Capacidade de troca de cations de frações organicas e minerais de solos. **Bragantia**. v.28, p.85-112, 1969.

RAIJ, B. van ; QUAGGIO, J.A; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, C.O. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargil, 1987, 170p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A; FURLANI, A.M.G. **Recomendacao de adubacao e calagem para o Estado de Sao Paulo**. Campinas: Instituto Agronomico/ Fundacao IAC, 1996. 285p. (Boletim, 100)

RAMOS, M. **Sistemas de preparo mínimo do solo: técnicas e perspectivas para o Paraná**. Ponta Grossa: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Representante Estadual do Paraná, 1976. 23p. (Comunicado técnico, 1).

REICHARDT, K.; VIEIRA, S. R.; LIBARDI, P. L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v.10, p.1-6, 1986.

RETAILLACK, G. J. Book review of: Spatial Variability of Soils and Landforms. **Geoderma**, v.56, p.170-172, 1992.

RUHE, R. V. Geomorphic surfaces and the nature of soils. **Journal of Soil Science**, v.82, p.441-445, 1956.

RUHE, R. V. Elements of the soil landscape. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 7., Madison, 1960. **Transactions**. New York: Elsevier 1960. v.23, p.165-170

RUHE, R.V.; WALKER, P.H. Hillslope models and soil formation: I. Open systems. In: INTERNATONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 9., Adelaide, 1968.

Transactions. New York: Elsevier, 1968. v.4, p.551-560.

RUHE, R.V. **Geomorphology.** Atlanta: Houghton Mifflin, 1975. 1 v.

SÁ, J.C.M. Plantio direto em campos nativos. In: PEIXOTO, R.T.dos G.; AHRENS, D.C.; SAMAHA, M.J. (Eds.) **Plantio direto: o caminho para uma agricultura sustentável.** Ponta Grossa: Instituto Agrônômico do Paraná, 1997. cap.2, p.53-65.

SÁ, J.C.M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CARVALHO, J.G. (Eds.), **Soil fertility, soil biology, and plant nutrition interrelationships,** Lavras: UFLA, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. p. 267-320.

SÁ, M.F.M. Influência do material de origem, superfícies geomórficas e posição na vertente nos atributos de solos da região dos Campos Gerais, PR. Curitiba, 1995, 205p. Dissertação (M.S.) - Universidade Federal do Paraná.

SANCHEZ, P.A. **Properties and management of soils in the tropics.** New York: A Wiley-Interscience, 1976. p. 135-161: Clay mineralogy and ion exchange process.

SAS INSTITUTE. **JMP IN** - Statistical Discovery Software, version 3,0 for Windows. Belmont, 1997

SCHELLING, J. Soil genesis, soil classification and soil survey. **Geoderma**, v.4, p.165-193, 1970

SCHEPERS, J.S. World trend in Precision Agriculture. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 23., Uberlândia, 2000. **Palestra em CD-Rom.**, Uberlândia: ABMS, 2000.

SIDIRAS, N., PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo do solo no nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.9, p.249-254, 1985.

SILVA, J.E.; LEMANSKI, J.; RESCK, D.V.S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.18, p.541-547, 1994.

SIMONSON, R.W.; GARDNER, D.R. Concepts and functions of the pedon In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 7., Madison, 1960. **Transactions**. New York: Elsevier 1960. v.4, p.127-131.

SIMONSON, R.W. Concept of soil. **Advances in Agronomy**, v.20, p.1-47, 1968.

SKIDMORE, A.K. A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model. **International Journal of Geographical Information Systems**, v.3, p.323-34, 1989.

SLATER, B.K. Continuous classification and visualization of soil layers: A soil-landscape model of Pleasant Valley Wisconsin. Madison, 1994. 156p. Thesis (Ph. D.) - University of Wisconsin.

STONE, J.R.; GILLIAM, J.W.; CASSEL, D.K.; DANIELS, R.B.; NELSON, L.A.; KLEISS, H.J. Effects of erosion and landscape position on the productivity of Piedmont soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.49, p.987-991, 1985.

- TIMLIN, D.J.; PACHEPSKY, YA; SNYDER, V.A.; BRYANT, R.B. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. **Soil Science Society of America Journal**, v.62, p.764-773, 1998.
- THOMPSON, W. H.; ROBERT, P. C. Evaluation of mapping strategies for variable rate applications. In: SITE-SPECIFIC MANAGEMENT FOR AGRICULTURAL SYSTEMS. Minneapolis, 1994. **Proceedings**. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1995. p.303-323.
- THOMAS, G.T. **Labranza zero, resultados en Estados Unidos de la America y observaciones en campos argentinos**. Rosario: AAPRESID, 1990. 16p.
- TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v.38, p.45-94, 1985.
- TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Spatial dependence and interpolation of soil properties in West Sumatra, Indonesia: I. Anisotropic variation. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p.1391-1395, 1986.
- TREIN, E.; FUCK, R.A.; LOPES, J.A.; PALKA, J.; MURATORI, A. **Folha Geológica de Tibagi**. Curitiba: Comissão da Carta Geológica do Paraná, CODEPAR - UFPR, 1966. Escala 1:50.000.
- TROEH, F.R. Landform parameters correlated to soil drainage. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.28, p.808-812, 1964.
- UEHARA, G. Management of isoelectric soils of humid tropics. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B.A, (Eds). **Soil management and greenhouse effect**. Boca Raton: CRC Press, 1995. p.271-278.

UEHARA, G.; KENG, J. Management implications of soil mineralogy in Latin America. In: BORNEMIZA, E.; ALVARADO, A. (Eds.) **Soil management in tropical America**. Raleigh: North Carolina State University, 1975. p. 351-362.

USERY, E.L.; POCKNEE, S.; BOYDELL, B. Precision farming data management using geographic information systems. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.61, n.11, p.1383-1391, 1995.

VIDAL-TORRADO, P. Relações solo x relevo em Mococa (SP): Influência das características topográficas e posição na vertente nos atributos do solo. Piracicaba, 1989. 205p. Dissertação (Mestrado.) - Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiroz", Universidade de São Paulo.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal** , v.45, p.1040-1048, 1981.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, T.L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

VISCARRA, R.A.; McBRATNEY, A.B. Preliminary experiments toward a suitable soil sensor for continuous, "on the go" field pH measurements. In: **PRECISION AGRICULTURE' 97**, Oxford: BIOS Scientific Publishers, 1997, v.2, p. 493-501.

WAMBEKE, A.R. van. Criteria for classifying tropical soils by age. **Journal of Soil Science**, v.13, p.124-132, 1962.

WEBSTER, R. Fundamental Objections to the 7th approximation. **Journal of Soil Science**, v.19, p.354-366, 1968.

WEBSTER, R.; BURROUGH, P.A. Multiple discriminant analysis in soil survey.

Journal of Soil Science, v.25, p.120-134, 1974.

WEBSTER, R. **Quantitative and numerical methods in soil classification and**

survey. Oxford: Oxford University Press, 1977. 1v.

WENDROTH, O.; REYNOLDS, W.D; VIEIRA, S.R.; REICHARDT, K.; WITTH, S.

Statistical Approaches to the analysis of soil quality data. In: GREGORICH, E.G.;

CARTER, M.R. (Eds.) **Soil Quality for crop production and ecosystem health**.

Amsterdam: Elsevier, cap.1, 1997. p. 247-276.

WILDING, L.P. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys. In: NIELSEN, D.R.; BOUMA, J. (Eds.). **Soil Spatial Variability**.

Wageningen: Pudoc, 1985. 195p

WUNCHE, W.A.; DENARDIN, J.E. Perdas de solo por escoamento de água sob chuva natural em latossolo vermelho escuro nas culturas de trigo e soja. In:

ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO,

2, Passo Fundo, 1978, **Anais**, Passo fundo, EMBRAPA/CNP-Trigo, 1978. p.289-96.

YAALON, D.H. Conceptual models in pedogenesis: can soil-forming functions be

solved? **Geoderma**, v.14, p.189-205, 1975.

YOST, R.S.; UEHARA, G.; FOX, R.L. Geostatistical analysis of soil chemical

properties of large land areas. I. Semivariograms. **Soil Science Society of America**

Journal, v.46, p.1028-1032, 1982.

ZADEH, L.A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, p.338-353. 1965.