

**unesp**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
CÂMPUS DE JABOTICABAL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS



**FORMAS DO RELEVO E VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS  
QUÍMICOS E MINERALÓGICOS DE UM ARGISSOLO CULTIVADO COM  
CANA-DE-AÇÚCAR**

**Diogo Mazza Barbieri**

Engenheiro Agrônomo

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

2007

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS  
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**FORMAS DO RELEVO E VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS  
QUÍMICOS E MINERALÓGICOS DE UM ARGISSOLO CULTIVADO COM  
CANA-DE-AÇÚCAR**

**Diogo Mazza Barbieri**

**Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior**

**Co-orientador: Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal).

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Fevereiro de 2007

Barbieri, Diogo Mazza  
B236f Formas do relevo e variabilidade espacial de atributos químicos e mineralógicos de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar / Diogo Mazza Barbieri. -- Jaboticabal, 2007  
viii, 83 f. : il.; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2007  
Orientador: José Marques Júnior  
Banca examinadora: Marcilio Vieira Martins Filho, Luis Reynaldo Ferracciú Alleoni  
Bibliografia

1. Agricultura de precisão. 2. Gípsita. 3. *Saccharum officinarum*. I.  
Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.41:633.61

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Campus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CÂMPUS DE JABOTICABAL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS



### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO:** FORMAS DO RELEVO E VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBU-  
TOS QUÍMICOS E MINERALÓGICOS DE UM ARGISSOLO CULTI-  
VADO COM CANA-DE-AÇÚCAR

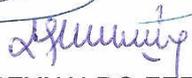
**AUTOR:**                  **DIOGO MAZZA BARBIERI**

**ORIENTADOR:**          **Dr. JOSE MARQUES JUNIOR**

**Co-Orientador(a):**    **Dr. GENER TADEU PEREIRA**

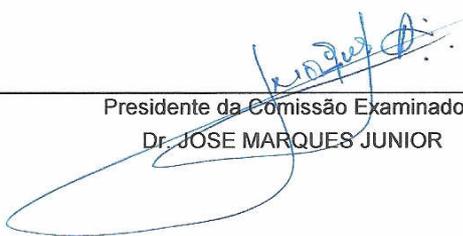
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em AGRONOMIA  
(PRODUÇÃO VEGETAL) pela Comissão Examinadora:

  
Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

  
Dr. LUIS REYNALDO FERRACCIÚ ALLEONI

  
Dr. MARCILIO VIEIRA MARTINS FILHO

Data da realização: 28 de fevereiro de 2007.

  
\_\_\_\_\_  
Presidente da Comissão Examinadora  
Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**DIOGO MAZZA BARBIERI** – nascido em 09 de Fevereiro de 1982 em Jaboticabal – SP. cursou o segundo grau no Colégio Objetivo de Jaboticabal com término em 1999. Em 2000 ingressou no curso de Engenharia Agronomia na Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal – SP, sendo estagiário do Departamento de Solos e Adubos de julho de 2000 a dezembro de 2004, sendo bolsista CNPq durante dois anos, desenvolvendo trabalhos de campo e laboratório. Em março de 2005 ingressou no curso de Mestrado em Agronomia na área de Produção Vegetal, na Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), com término em março de 2007.

**NINGUÉM PODE SERVIR A DOIS SENHORES,  
PORQUE AMANDO A UM DESPREZA O OUTRO,  
NÃO PODEIS SERVIR A DEUS E AO DINHEIRO!  
POR ISSO VOS DIGO:  
NÃO VOS ANGUSTIEIS POR VOSSA VIDA,  
QUE COMEREIS, QUE BEBEREIS,  
COM QUE VOS VESTIREIS;  
ACASO, A VIDA, NÃO VALE MAIS QUE O ALIMENTO?  
OLHAI AS AVES DO CÉU  
NÃO SEMEIAM NEM CEIFAM,  
VOSSO PAI CELESTE AS ALIMENTA!  
E ALÉM DO MAIS, QUEM DE VÓS POR MAIS QUE SE PREOCUPE,  
PODE ACRESCENTAR UMA HORA SÓ A MEDIDA DE SUA VIDA  
E COM AS VESTES PORQUE VOS PREOCUPAIS?  
OLHAI OS LÍRIOS DO CAMPO  
NÃO SE AFADIGAM NEM FIAM,  
SALOMÃO NÃO VESTIA COMO ELES!  
BUSCAI PRIMEIRO O REINO DE DEUS  
E TUDO VOS SERÁ DADO!**

**(MT 6, 24-33)**

## **A Deus**

Aos meus pais,

**João Carlos Barbieri e Maria Aparecida Mazza Barbieri**

por serem os grandes responsáveis por mais essa conquista graças a todo o amor,  
carinho e dedicação de toda uma vida,

## **DEDICO**

A minha querida tia **Fátima Aparecida Barbieri Braga**, aos meus queridos irmãos  
**Gislaine Mazza Barbieri e Rafael Mazza Barbieri**, e a minha amada noiva **Denise da  
Silva Martins** que sempre me ajudaram e apoiaram  
nos momentos mais difíceis.

## ***OFEREÇO***

## *AGRADECIMENTOS*

Ao meu saudoso avô José Barbieri que dedicou grande parte de sua honrosa vida na construção dessa universidade na qual me formei e que hoje concluo este trabalho.

Aos meus avós Olívio Mazza, Zenayde Batista Ferreira Mazza e Yolanda Secato Barbieri por todo o amor e carinho que sempre me dedicaram.

Aos meus tios José Henrique Barbieri, Maria Rosa Machado Barbieri, Jairo Antonio Mazza, Sueli Minatel Mazza e Edson Ibelli Braga que sempre me incentivaram e apoiaram a estudar.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP – Jaboticabal que me acolheu e possibilitou a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. José Marques Júnior que durante estes anos esteve comigo, tornando-se um grande amigo e me orientando na realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Gener Tadeu Pereira que neste período me auxiliou e orientou na realização deste trabalho, tornando-se um grande amigo.

Aos colegas de Departamento Diego (Pimpão) Renato (Perobo), Rafael (Carniça), Milton, Lívia, Renata (Tagerela), Alan e Amauri pela ajuda na realização deste trabalho e pelas inesquecíveis viagens aos congressos.

Ao amigo Fernando Garbui pela grande ajuda na realização deste trabalho.

Aos amigos de minha cidade Fábio (Rodela), Ricardo (Quejinho), Zé (Galão), Mauricio, Taty, Fábio (Catanduva), Guilherme (Gui), Leonardo (Léo) que sempre estiveram ao meu lado nas dificuldades da vida.

Aos amigos do neocatecumenato Rangel, Ethel, Amarildo (Didão), Daniele (Dani), Fernando, Samuel, Aline, Douglas, Marina, Renato, Caren, Marcio, Mirela por sempre estarem ao meu lado nos momentos difíceis da vida.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Adubos Aduino S. Alves, Dejair L. Silva, Orivaldo G.S. Rosa, Orivaldo S. Gomes, Luis M.P. Souza, Ademir F. Silva, Hoster A. Pereira, Célia R.F. Muniz, Maria I. Bueno, Cláudia C.D.M. Cirilo, Martha G. Pato pela paciência e presteza na realização dos trabalhos referentes ao curso e pela amizade.

Ao CNPq- Centro Nacional de Pesquisas Tecnológicas pelo apoio financeiro através da bolsa concedida.

A Usina São Domingos pela concessão da área e suporte para a realização da pesquisa.

Aos Professores do Departamento de Solos e Adubos.

A todos que fizeram parte destes quatro anos de batalha.

**Muito obrigado...**

## SUMÁRIO

	Página
RESUMO .....	vii
SUMMARY .....	viii
CAPÍTULO 1. Considerações gerais.....	1
CAPÍTULO 2. Caracterização química, mineralógica, e adsorção de fósforo em áreas com mesmo histórico de manejo e diferentes posições na paisagem.....	35
CAPÍTULO 3. Variabilidade espacial de atributos químicos de um argissolo para aplicação de insumos à taxa variável em diferentes formas do relevo.....	58
APÊNDICE .....	74

## **FORMAS DO RELEVO E VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E MINERALÓGICOS DE UM ARGISSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR**

**RESUMO** - A agricultura de precisão implica a análise da variabilidade espacial dos fatores de produção e a aplicação dos insumos de forma localizada e em doses precisas. O presente trabalho teve por objetivo analisar a influência do relevo na variabilidade espacial dos atributos químicos e mineralógicos para aplicação de insumos em taxa variável. Duas parcelas de um hectare foram delimitadas em área côncava e convexa. Foram retiradas 121 amostras em cada área. Os teores de P disponível apresentaram-se diferenciados nas duas áreas estudadas, sendo que os menores valores médios de P se encontram na área convexa na qual estão presentes os maiores teores de gibsita. A formação dos minerais da fração argila é condicionada pelas variações do relevo, sendo que a área convexa apresentou ambiente mais favorável à formação da gibsita do que a área côncava, demonstrando que o relevo pode ser utilizado para a definição de limites de área mais homogênea. A gibsita foi o fator determinante para a maior capacidade de adsorção máxima de P e a menor disponibilidade de fósforo na área convexa. O uso da técnica de geoestatística possibilitou a precisa descrição das propriedades do solo.

**Palavras-chave:** Agricultura de precisão; adsorção de fósforo; gibsita.

## SHAPES OF RELIEF AND SPATIAL VARIABILITY OF CHEMICAL AND MINERALOGICAL ATTRIBUTES OF AN ARGISOL CULTURED WITH SUGAR CANE

**ABSTRACT** – Precision agriculture implies on the analysis of the spatial variability of the production factors and the application of inputs in a localized way and on precise doses. The present work aimed to analyze the influence of the relief on the spatial variability of the chemical and mineralogical attributes for the application of inputs in variable rates. Two parcels of one hectare were bounded in concave and convex area. 121 samples were taken from each area. The levels of available P have shown to be different on the two studied areas, being the lowest mean values of P on the convex area, where the highest levels of gibbsite are present. The formation of the minerals from the clay fraction is conditioned by the relief variations, being that the convex area has presented a more favorable environment for the formation of gibbsite than the concave area, showing that relief may be used for the definition of limits in more homogenous areas. Gibbsite was the determinant factor for the higher capacity of P maximum adsorption and lower availability of phosphorous on the convex area. The use of the geostatistics technique has made possible the precise description of the soil properties.

**Key-words:** Precision agriculture, P adsorption, chemical management of the soil, gibbsite.

## **CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS**

### **INTRODUÇÃO**

A cana-de-açúcar ocupa hoje, no Brasil, área de 5,5 milhões de hectares, com previsão de expansão para 7,5 milhões de hectares até 2010. Atualmente, 41 novas usinas estão em fase de implantação, sendo que 28 delas serão instaladas no Estado de São Paulo (OESP, 2005). A cultura da cana-de-açúcar é altamente mecanizada e utiliza grande quantidade de insumos em seu cultivo. As operações de preparo inicial do solo, correção da fertilidade, plantio, adubação e colheita podem ser completamente mecanizadas. O ciclo da cana-de-açúcar normalmente é de cinco anos, sendo que o plantio é realizado apenas no primeiro, e nos demais anos o rebrote é cultivado e colhido anualmente até que sua produtividade demonstre ser economicamente viável sua renovação.

A aplicação de corretivos no solo e a adubação de plantio são de fundamental importância na cultura da cana-de-açúcar. A importância destas operações incide no fato de que a base para a produção da cultura está sendo estabelecida nesta fase e terá duração mínima de cinco anos. Nesse momento, faz-se a correção da acidez do solo, com aplicação de calcário ou outros corretivos, como o silicato, e pode-se optar também pela correção dos teores de fósforo no solo (MENEGATTI et al., 2006).

O uso de fertilizantes minerais foi intensificado a partir dos anos 60, como resultado do desenvolvimento e adoção de estratégias mais tecnificadas de gerenciamento de insumos (HAVLIN et al., 1999). De acordo com CAREY (1991), a intensa utilização de fertilizantes e de outros insumos agrícolas permitiu significativos ganhos de produtividade, mas proporcionou, entretanto, problemas ambientais. Devido à utilização indiscriminada de fertilizantes ocorrida nas últimas décadas, o potencial dos mesmos de causarem impactos negativos ao ambiente tem sido fortemente evidenciado. Segundo EWG (2006), grupo americano que realiza trabalhos de cunho ambiental voltados à sociedade, há uma clara relação entre estados e regiões dos Estados Unidos com alta utilização de fertilizantes e contaminação ambiental por nitrato.

A variabilidade espacial das propriedades do solo, que se faz presente em qualquer lavoura e que varia em intensidade, deve ser considerada para o gerenciamento adequado do sistema produtivo. WARRICK (1998) descreve as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos como altamente variáveis em todos os níveis de observação. O uso de coordenadas geográficas associadas à amostragem de solo e a dados de campo permitem a geração de mapas de atributos que podem ser utilizados para elaboração de mapas de recomendação de fertilizantes. A aplicação dessa tecnologia é de grande importância no sentido de se evitar a utilização de doses de fertilizantes superiores às necessárias, e se constitui ferramenta fundamental para reduzir os impactos negativos da agricultura ao ambiente (BISCARO & GARZELLA, 2006; MOLIN, 2001).

Deste modo o conhecimento da variabilidade espacial dos atributos dos solos torna-se de grande importância para a geração de mapas confiáveis para a tomada de decisão. Muitas são as causas da variabilidade dos solos, dentre as quais estão as formas da paisagem que têm despertado o interesse de vários pesquisadores (SOUZA et al., 2006b; MONTANARI et al., 2005; LEÃO, 2004; SOUZA, 2004). SOUZA et al. (2006a) e SOUZA et al. (2004) concluíram em seus estudos que a identificação de compartimentos da paisagem se mostrou muito eficiente no estudo da variabilidade espacial dos atributos químicos e que pequenas variações nas formas do relevo condicionam variabilidade diferenciada para os atributos químicos.

A geoestatística é outra ferramenta importantíssima para o estudo da variabilidade espacial, por possibilitar eficiente análise e mapeamento dos mais diversos atributos (SIQUEIRA et al., 2006). Os conceitos utilizados até o momento não explicam a continuidade espacial de um determinado atributo. A dependência espacial manifesta-se como uma correlação entre as amostras a qual diminui à medida que a distância entre os pontos amostrais aumenta, e desaparece completamente, quando a distância entre os pontos amostrais é suficientemente grande, os quais, neste caso, são considerados estatisticamente independentes (VIEIRA, 2000).

## REVISÃO DE LITERATURA

### **Aplicação de fertilizantes a taxa variável – economia e respeito ambiental**

Há uma necessidade de aumento de eficiência de todos os setores da economia globalizada para manter a competitividade. Para a agricultura, não poderia ser diferente. A evolução da informática, tecnologias em geoprocessamento, sistemas de posicionamento global e muitas outras tecnologias estão proporcionando à agricultura uma nova forma de se enxergar a propriedade. Essa mudança é necessária para que se entenda que a propriedade não é homogênea e que se trate cada parte conforme as suas necessidades, fazendo com que o produtor tenha o conhecimento detalhado em cada parte da linha de produção ou cada metro quadrado da sua propriedade (TSCHIEDEL & FERREIRA, 2002).

Atualmente, a maior parte das propriedades agrícolas são tratadas como homogêneas, levando ao conceito da necessidade média para a aplicação dos insumos - fertilizantes, defensivos, água, etc. - o que faz com que, por exemplo, a mesma formulação e/ou quantidade do fertilizante seja utilizada para toda a área, atendendo apenas às necessidades médias e não considerando, desta forma, as necessidades específicas de cada parte do campo. O mesmo acontece para os demais insumos, causando como resultado uma lavoura com produtividade não-uniforme (MOLIN, 2004; TSCHIEDEL & FERREIRA, 2002; CAPELLI, 1999;).

A agricultura de precisão promete reverter o quadro atual, permitindo a aplicação de insumos agrícolas nos locais corretos e nas quantidades requeridas (FATORGIS, 1998). A aplicação de insumos, principalmente agrotóxicos e fertilizantes aplicados de maneira ineficiente, gera problemas ambientais e aumento do custo de produção (DAINESE et al., 2003). A procura da otimização destes bens de produção tem influenciado na busca de novas alternativas tecnológicas e novos conceitos para a operacionalização do processo produtivo, aliados à necessidade do manejo de grandes volumes de informações, que variam no espaço e no tempo (DAINESE et al., 2003).

A agricultura de precisão implica a análise da variabilidade espacial dos fatores de produção, especialmente do solo. A partir dessa análise, as decisões devem ser

tomadas para que se faça, então, a aplicação dos insumos de uma forma localizada e com dosagens precisas. A tecnologia deve ser, no entanto, validada com base em análises que provem as suas vantagens não apenas econômicas, mas também de benefícios ao meio ambiente por resultar em menor excedente de insumo (MOLIN, 1997).

De acordo com MENEGATTI et al. (2006), nas usinas onde o sistema de agricultura de precisão já foi adotado, ocorria excesso no uso de insumos, e o uso da aplicação, segundo critérios localizados e detalhados, trouxe redução no uso destes insumos sem causar queda na produtividade. Na usina em que foi possível verificar o efeito na produtividade, ele foi positivo e consistente. BARBIERI (2004), estudando Latossolos cultivados com cana-de-açúcar, também encontrou erros de dosagem na aplicação convencional quando comparada a aplicações de forma localizada.

A implantação da aplicação em taxa variada, na Usina Açucareira Guairá, resultou em redução de custo na correção do solo de R\$ 10,94 por ha, com aumento médio de produtividade constatada, de 4,5 %, equivalente a 5,98 t ha<sup>-1</sup>. Ao preço médio do Estado de São Paulo em março de 2006, de R\$ 35,09 por tonelada, representa R\$ 210,01 por hectare. A margem de contribuição total da aplicação em taxa variada foi de R\$ 220,95 por hectare (MENEGATTI et al., 2006).

Na Usina Jalles Machado, MENEGATTI et al. (2006) encontraram uma diferença de consumo médio entre a aplicação em taxa variada e em taxa fixa de fósforo, no ano de 2004, de 39 %. O consumo real total de insumo foi de 2.493 t, com dose média de 418 kg ha<sup>-1</sup>, enquanto o consumo estimado em taxa fixa foi calculado em 4.107 t, com dose média estimada de 688 kg ha<sup>-1</sup>. A economia de insumos foi calculada em R\$ 362.379,63.

HAMMOND (1994) observou que, em várias áreas testadas, não houve economia de fertilizante. Porém, observando-se os erros de dosagem em áreas de aplicação convencional, conclui-se que grandes áreas receberiam doses inferiores à recomendada, enquanto outras receberiam quantidades superiores à desejada. De acordo com WOLLENHAUPT & WOLKOWSKI (1994), o custo de aplicação localizada, incluindo a amostragem e a análise, varia em função do quadriculado das amostragens e cresce rapidamente para celas com menos de 60 metros de lado. STONE et al.

(1995), estudando pequenas parcelas, fizeram comparações entre a aplicação fixa e a variada de nitrogênio na cultura do trigo. Embora não tenham encontrado diferença significativa em produtividade, obtiveram redução na aplicação de nitrogênio de até 50%.

WHITNEY et al. (2005) fizeram simulações e uma análise econômica da aplicação localizada de nitrogênio em cobertura, na cultura do trigo, e compararam com a aplicação em taxa uniforme. Considerando o custo do fertilizante e a perda de produtividade causada pela deficiência de nitrogênio, sugeriram que a aplicação uniforme resultaria em um custo direto e indireto de 26,25 dólares por hectare maior que a aplicação localizada com celas de 0,56 m<sup>2</sup>. Esse valor representa 75% do custo da adubação nitrogenada em questão.

De acordo com LOWENBERG-DEBOER & SWINTON (1995) e MOLIN (1997), a definição do nível de detalhamento necessário para a tomada de decisões, bem como a escala temporal e espacial para a coleta de dados são questões ainda sem uma resposta precisa e afetam sensivelmente o custo do sistema e, conseqüentemente, a sua rentabilidade.

Uma das maneiras mais utilizadas para representar a variabilidade espacial dos atributos do solo em uma área é por meio de mapas de isolinhas (BURGESS & WEBSTER, 1980). Dentro do conceito de agricultura de precisão, são definidos três tipos de mapas de isolinhas: mapas de condição, mapas de recomendação ou prescrição e mapas de desempenho. Os mapas de condição mostram a distribuição espacial dos parâmetros avaliados em uma determinada área, antes de qualquer intervenção. Mapas de recomendação são derivados de um ou mais mapas de condição e contêm informações sobre as quantidades necessárias de insumos e/ou práticas agrícolas que cada local específico da área deverá receber (manejo específico), respeitando a variabilidade dos atributos avaliados (mapas de condição), sendo a base para a tecnologia da aplicação em doses variáveis. O mapa de desempenho permite avaliar como a área se apresenta após o manejo específico, caracterizando-se também como mapa de condição para um próximo ciclo no contexto da agricultura de precisão.

Entretanto, tem-se verificado que consultores agrônômicos, durante o processo de elaboração dos mapas de isolinhas, utilizando programas de computador disponíveis no mercado para suporte em agricultura de precisão, não levam em consideração a dependência espacial dos atributos analisados para estimar valores em locais não-amostrados. Eles elaboram os mapas utilizando métodos baseados em interpolação linear ou polinômios, deixando dúvida em relação à acurácia dos mapas. A razão para tal fato é que tais profissionais são simples usuários dos programas e, na maioria das vezes, não têm conhecimentos científicos necessários sobre o que está envolvido no processo de elaboração dos mapas pelos programas, não questionando, portanto, a precisão dos mesmos.

No âmbito da Agricultura de Precisão, existem duas alternativas para se fazer a aplicação a taxas variadas: em tempo real e programada. Na aplicação em tempo real, são usadas máquinas que levantam, por meio de sensores, e analisam informações sobre um determinado atributo específico, à medida que se deslocam pelo espaço das lavouras. Estas máquinas possuem dispositivos que comandam a dosagem e o local de aplicação de insumos, a partir das informações coletadas a cada intervalo de tempo. Nas aplicações programadas, no lugar de sensores, as máquinas são programadas segundo mapas de aplicação previamente elaborados, a partir de informações coletadas de forma georreferenciada e analisadas de modo a definir as quantidades de insumos que serão aplicadas nos diferentes pontos das lavouras. Até os dias atuais, seja em decorrência do custo das máquinas, seja pelo estágio mais avançado da tecnologia, a implementação das técnicas de agricultura de precisão que têm sido mais amplamente utilizadas, dizem respeito àquelas baseadas nos mapas de rendimento e em mapas de aplicação (MATTOSO & GARCIA, 2006).

A aplicação em taxa variada teoricamente age contra a variabilidade espacial dos atributos do solo. O mapa de aplicação nada mais é que uma representação contrária ao mapa do atributo, cuja finalidade é suprir o solo nas áreas em que foi detectada deficiência do nutriente. Assim, é de se esperar que a avaliação do solo, após a aplicação em taxa variada, resulte em menor variabilidade espacial (MENEGATTI et al., 2006).

A agricultura de precisão é uma realidade cada vez mais abrangente no sistema de produção da cana-de-açúcar. Foram apresentadas informações concretas e relevantes, e consistentes no entendimento da agricultura de precisão como uma ferramenta capaz de racionalizar o uso de insumos, aplicar localizadamente insumos em taxa variada, agir sobre o solo, trazendo uniformidade ao meio produtivo, aumentar a produtividade e a margem de contribuição do campo à unidade processadora de cana (MENEGATTI et al., 2006).

### **Variabilidade espacial dos solos em diferentes formas do relevo**

A necessidade da obtenção de maiores produtividades das culturas, conservando a sustentabilidade dos agroecossistemas tem levado a uma busca gradativa do conhecimento das variáveis envolvidas nos sistemas de produção, onde determinar as causas da variabilidade dos atributos do solo é uma forma de tomada de decisão em relação às técnicas de manejo a se adotar (POCAY, 2000).

Numa paisagem natural, o solo apresenta ampla variabilidade dos seus atributos (MONTEZANO et al., 2006) tanto no sentido espacial como no volumétrico, resultante da interação dos processos que comandam os fatores de sua formação. Além disso, o solo cultivado revela fontes adicionais de heterogeneidade, originadas exclusivamente do efeito antrópico da agricultura (CARVALHO et al., 2003).

Para ABREU et al. (2003), o solo, por ser um corpo tridimensional formado pela ação de vários fatores e processos, apresenta uma variação de suas características ao longo da paisagem. Vários são os autores que encontraram relação entre a variabilidade espacial dos atributos do solo e as formas da paisagem (SOUZA et al., 2006b; MONTANARI et al., 2005; LEÃO, 2004; SOUZA, 2004). Para BOUMA & FINKE (1993), a capacidade de previsão dessa variabilidade depende de pesquisas direcionadas ao entendimento dos processos geológicos e pedológicos que atuaram e continuam atuando no local da paisagem. Neste sentido, a variabilidade do solo sempre existiu e deve ser considerada nas amostragens de campo (VIEIRA, 2000), visando à aplicação do manejo mais racional do solo (MARQUES JÚNIOR & LEPSCH, 2000; MONTEZANO et al., 2006). Para SOUZA (2004), o estudo da variabilidade do solo,

levando em consideração as superfícies geomórficas e os segmentos de vertente associados às unidades de mapeamento de solo, é uma ferramenta importante.

Ultimamente, pesquisas ligadas à agricultura de precisão têm reconhecido a forte influência da posição da paisagem na produção de culturas. Neste sistema, existe uma forte dependência do conhecimento das relações dos atributos do solo na paisagem, já que os mapas de produção econômica são gerados com base na variabilidade do solo (VAIDYA & PAL, 2002; LI et al., 2001; KACHANOSKI et al., 1996; BOUMA et al., 1999).

Para DANIELS & HAMMER (1992), dentre os processos, o que mais afeta a distribuição espacial dos atributos dos solos, é a quantidade, o fluxo e a distribuição sazonal de água. As oscilações na concentração de fluxos condicionam ambientes específicos, por interferir no movimento de bases e no comportamento das argilas. Outros autores salientam a importância dos fluxos verticais na encosta, interferindo nas variações morfológicas e mineralógicas (MONIZ et al., 1994; ZASLAVSKY & ROGOWSKI, 1969), nos processos de formação do horizonte B textural (ALMEIDA et al., 1997; ALVES & RIBEIRO, 1995; VIDAL-TORRADO, 1994; CASTRO, 1989;) e na variabilidade de atributos de B latossólicos (POCAY, 2000).

Superfícies do terreno, modeladas por processos erosionais, são definidas e classificadas por vários autores para aplicação pedológica. TROEH (1965) apresenta nove tipos básicos de pedoformas que são representados pelas letras C (curvatura) e P (perfil), ambas acompanhadas por sinais: (+) concavidade (forma que favorece a concentração de água) e (-) convexidade (que favorece a dispersão e a perda de água pelo sistema).

SOUZA et al. (2006b), estudando otimização amostral em malha de 10x10 metros, encontraram para os atributos químicos e físicos mais de 84% dos pontos plotados na pedoforma côncava e convexa em relação à pedoforma linear. De acordo com os autores, o maior número de pontos otimizados pelo programa Sanos for Windows 0.1 indica que pedoforma côncava e convexa apresentou maior variabilidade espacial para os atributos químicos e físicos do que a pedoforma linear.

SOBIERAJ et al. (2002) e ZEBARTH et al. (2002) também encontraram relação de atributos químicos com diferentes posições na paisagem. De acordo com SANCHEZ (2003), as propriedades químicas e granulométricas de solos intensamente manejados

possuem dependência do relevo, mesmo de pequena expressão, e os limites entre as superfícies geomórficas podem definir locais específicos de manejo.

Já MONTANARI et al. (2005), comparando a variabilidade espacial em diferentes posições da paisagem em uma área de aproximadamente 100 ha, concluíram que a otimização amostral em ambas as profundidades, indica que a pedoforma côncava apresenta maior variabilidade espacial para os atributos químicos do solo do que a pedoforma linear. Nesse sentido, estas informações são válidas como critério auxiliar no planejamento de amostragem de solo, que, no caso da agricultura de precisão, representa o fator limitante nos estudos de reconhecimento e mapeamento de locais específicos de manejo. Para SOUZA et al. (2004), a compartimentação das formas do relevo revela ser eficiente para identificação e mapeamento de áreas com variabilidade controlada, bem como a transferência de informações.

### **Disponibilidade de fósforo e sua relação com a mineralogia da fração argila**

O fósforo é um dos principais fatores limitantes ao desenvolvimento da cultura e longevidade do canavial. Ao mesmo tempo, é uma operação de grande investimento devido ao custo das fontes fosfáticas. As tecnologias de agricultura de precisão são uma importante ferramenta para a redução do valor do investimento aplicando de forma localizada as doses de fósforo. Algumas usinas no Brasil têm utilizado a agricultura de precisão como ferramenta para a racionalização do uso de insumos e corretivos com resultados relevantes (MENEGATTI et al., 2006).

BARBIERI (2004), trabalhando com agricultura de precisão, encontrou necessidades de aplicação de fósforo variando de 60 a 120 kg ha<sup>-1</sup> quando levadas em conta as particularidades de cada ponto da área. Entretanto, em solos com altos teores de óxidos de ferro, via de regra, é baixa a eficiência da adubação fosfatada, pois grande parte do P adicionado torna-se imóvel ou não-disponível, em virtude de reações de adsorção em colóides minerais, precipitação ou conversão em formas orgânicas (MOTTA et al., 2002).

Parte da importância do fenômeno de adsorção de fósforo em solos deve-se ao fato de ser ele um dos ânions mais fortemente retidos (MOTTA et al., 2002; RAIJ,

1991). Deste modo, estes solos requerem altas quantidades de fertilizantes fosfatados para manter as produtividades das culturas em níveis economicamente sustentáveis.

De acordo com VEITH & SPOSITO (1977), as reações de adsorção acontecem em dois estádios: um rápido, em que ocorre a adsorção propriamente dita, e um mais lento, a precipitação. O estádio rápido pode ser observado em superfícies de goetita, hematita e gibsita e está, provavelmente, associado à alta energia de adsorção e à baixa saturação da superfície de adsorção. A adsorção do fósforo depende do tipo de cristalinidade dos óxidos de ferro e alumínio, podendo ser afetada pela matéria orgânica, principalmente por esta competir com o íon fosfato pelos sítios de adsorção (HEREDIA & CIRELLI 2007; SILVA et al., 2001; MESQUITA FILHO & TORRENT, 1993).

O teor e a constituição mineralógica da fração argila assumem papel importante na caracterização de um solo como dreno ou fonte de fósforo (ROLIM NETO et al., 2004; MESQUITA FILHO & TORRENT, 1993; BORGGAARD et al., 1990). Desta forma, solos muito intemperizados (oxídicos), com elevado teor de argila, exercerão predominantemente a função de drenos, enquanto aqueles poucos intemperizados (ricos em minerais primários silicatados) exercerão o papel de fontes (NOVAIS & SMYTH, 1999).

Estudos têm relacionado a capacidade de adsorção de fósforo dos solos com o teor de argila e superfície específica (JUO & FOX, 1977; LEAL & VELLOSO, 1973), porém, segundo KER (1995) e BAHIA FILHO (1982), pouca ênfase tem sido dada ao conhecimento da natureza da fração argila e da composição mineralógica na capacidade de adsorção de fósforo. Quanto à mineralogia e características de cristalinidade dos óxidos de ferro e alumínio, vários estudos têm mostrado que a capacidade de adsorção de fósforo parece estar relacionada com a área superficial do óxido (FONTES & WEED, 1996) e com o seu grau de cristalinidade.

A goetita apresenta-se como o óxido de maior responsabilidade pela adsorção de fósforo (MOTTA et al., 2002). Porém a gibsita, quando presente em altas quantidades no solo, pode passar a ser a maior responsável pelo menor teor de fósforo disponível. Vários autores encontraram resultados comprovando a maior participação da gibsita em relação à goetita no fenômeno de adsorção de fósforo (MOTTA et al., 2002; MESQUITA

FILHO & TORRENT, 1993; CURI et al., 1988; DICK, 1986; BAHIA FILHO, 1982). SCHAEFER et al. (2004) e ROLIM NETO et al. (2004), estudando a relação entre a mineralogia de Latossolos e a capacidade máxima de adsorção de fósforo, encontraram maior correlação positiva entre a adsorção máxima de fósforo e o teor de gibsitita, do que entre adsorção de fósforo e a goetita, demonstrando a importância dos óxidos de alumínio neste fenômeno.

Para CARVALHO (1981), a participação do relevo também é importante, visto que o relevo, de maneira geral, influencia na quantidade de água incorporada no solo, acelerando as reações químicas do intemperismo, promovendo o transporte de sólidos ou de materiais em solução e produzindo efeitos que se traduzem em diferentes tipos de solos, nas diversas posições das toposseqüências.

Os diferentes teores de minerais da fração argila na toposseqüência podem ser atribuídos à ação da drenagem, onde a percolação da água no perfil remove o Si das partes mais altas (topo), carregando para as partes mais baixas do relevo (HSU, 1989). Com a perda de Si, chegando a concentração do elemento ser próxima a zero na solução do solo, a formação da gibsitita é favorecida. Já nas partes mais baixas, a maior concentração de Si favorece sua recombinação com Al e formação da caulinita (ANTONELLO, 1983).

Adicionalmente à quantidade e proporção dos minerais na fração argila dos solos ao longo da toposseqüência, as suas características cristalográficas, como, por exemplo, cristalinidade, diâmetro médio do cristal, substituição isomórfica de elementos na estrutura e superfície específica, podem apresentar efeito pronunciado nas características físico-químicas dos solos, além de indicar a natureza dos ambientes pedogenéticos (SCHWERTMANN, 1988; KÄMPF et al., 1988; FITZPATRICK & SCHWERTMANN, 1982).

## **Métodos estatísticos de análise dos atributos do solo**

### **- Estatística clássica**

A estatística clássica tem sido muito utilizada em pesquisas na Ciência do Solo, pois fornece uma indicação inicial do comportamento dos dados, permitindo uma análise prévia da população em estudo. As medidas estatísticas usualmente calculadas são: média, mediana, valor máximo e mínimo, coeficiente de assimetria e de curtose, coeficiente de variação e teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov. Nos casos em que os atributos estudados apresentam valores discrepantes, esses devem ser descartados e, nessas situações os procedimentos da análise devem ser aplicados novamente (RIBEIRO JÚNIOR, 1995).

O parâmetro mais conhecido e utilizado na estatística clássica é a média aritmética (WEBSTER & OLIVER, 1990), devido, principalmente, à simplicidade de sua obtenção e às fortes propriedades matemáticas a ela inerentes, que permitem sua utilização em problemas tanto teóricos como práticos (IEMMA, 1992). Outro parâmetro é a mediana, que representa o valor central da variável quando as observações são classificadas em ordem crescente. Portanto a quantidade de valores menores e maiores que a mediana é igual. Matematicamente, a mediana é menos tratável que a média, mas apresenta a vantagem de ser menos sensível a valores discrepantes (WEBSTER & OLIVER, 1990). A média e a mediana descrevem o equilíbrio ou o centro de uma distribuição (SILVEIRA JUNIOR et al., 1989). Segundo FARIAS (1999), LIBARDI et al. (1996), SALVIANO (1996), COSTA NETO (1990), valores das duas medidas, aproximadamente iguais, sugerem um possível ajuste dos dados à distribuição normal.

Usam-se como medidas de dispersão ou variabilidade dos dados, em torno da média, a variância, o coeficiente de variação, a assimetria e a curtose (LIBARDI et al., 1996). Estas medidas visam a fornecer o grau de variabilidade das observações, geralmente utilizando como padrão uma medida de tendência central (SILVEIRA JUNIOR et al., 1989).

GROSSI SAD (1986) revela que um modo muito objetivo de se estimar a variabilidade das amostras é comparar o comportamento do atributo estudado com modelos teóricos, utilizando-se de curvas de distribuição de frequência. As curvas de frequência mais usuais, obtidas a partir de variáveis do solo, são: normal ou log normal (SPIEGEL, 1993; GROSSI SAD, 1986). Se a distribuição não é normal, significa que a

média aritmética é uma medida bastante influenciada pelos valores extremos, não sendo adequada para a representação dos dados (EGUCHI, 2001; FARIAS, 1999; QUEIROZ, 1995).

O coeficiente de variação (CV) é uma relação entre o desvio-padrão e a média do conjunto de dados, e expressa o grau de variabilidade do atributo (GROSSI SAD, 1986). A utilização do coeficiente de variação na avaliação da variabilidade dos dados tem a vantagem de permitir a comparação entre propriedades distintas, pois é uma medida adimensional, apresentando o mesmo valor, independentemente das unidades utilizadas nas medidas (MACHADO, 1994; DOURADO NETO, 1989; WARRICK & NIELSEN, 1980). O CV dá idéia da magnitude de variabilidade de propriedades químicas e físicas dos solos, porém nada informa quanto à estrutura de dependência espacial dessas propriedades, o que só é possível através de técnicas geoestatísticas (SOUZA, 1999).

A curtose é uma medida do grau de achatamento da curva de distribuição de probabilidade (ASSIS et al., 1996). A assimetria é o grau de desvio ou afastamento da simetria de uma distribuição. Se a curva de freqüência de uma distribuição tem o ramo mais longo à direita, em direção a valores mais positivos, diz-se que a distribuição tem assimetria positiva. Caso ocorra o inverso, diz-se que tem assimetria negativa (SPIEGEL, 1993). Os coeficientes de assimetria e curtose são utilizados para avaliar se os dados seguem uma distribuição normal. Para dados que seguem perfeitamente a curva de distribuição normal, os valores do coeficiente de assimetria e curtose, obtidos por meio do software SAS, devem ser 0, sendo aceitos valores entre +2 e -2. Uma acentuada assimetria à direita ou à esquerda pode ser verificada para as variáveis, indicando que há uma elevada freqüência de valores abaixo ou acima da média, respectivamente (SOUZA, 1999).

O fato de os dados das variáveis não se ajustarem a uma distribuição normal, implica a limitação da utilização de métodos oriundos da estatística clássica, para os quais esse requisito é básico (MEAD & CURNOW, 1983). Ao contrário, quando os dados se ajustam próximos à distribuição normal, a média aritmética pode ser considerada uma medida de tendência central, representativa do conjunto de dados,

podendo ser utilizada no sistema de manejo do solo (SILVA JUNIOR, 2001; FIETZ, 1998; CARVALHO, 1991).

Para o uso da estatística clássica em dados oriundos de experimentos de campo, é admitido solo homogêneo. Portanto, área e/ou solo homogêneos são escolhidos, muitas vezes, sem um critério bem definido de homogeneidade, onde as parcelas são distribuídas ao acaso para evitar o efeito da irregularidade porventura existente (CARVALHO et al., 2002). O problema está na impossibilidade de se saber, antes de amostrar, se as amostras são dependentes ou independentes. Devido a estas limitações e pelo fato de os solos serem heterogêneos, SILVA (1988) afirmou ser necessária a utilização de procedimentos estatísticos adicionais que considerem e reflitam essas variações, tal como a geoestatística, que pode ser utilizada havendo dependência espacial.

#### **- Geoestatística**

Vários trabalhos têm demonstrado que observações vizinhas, de variáveis do solo, apresentam correlação ou dependência espacial (GREGO & VIEIRA, 2005; VIEIRA et al., 1983). Segundo TRANGMAR et al. (1985), FIETZ (1998) e GONÇALVES (1997), a estatística clássica assume que a variabilidade do valor de uma propriedade do solo em torno da média é aleatória e independente da posição espacial dos valores amostrais. No entanto, VIEIRA et al. (1981) mostraram que a variabilidade de propriedades do solo é espacialmente dependente, ou seja, dentro de certo domínio, as diferenças entre os valores de uma propriedade do solo podem ser expressas em função da distância de separação entre as observações medidas.

Conseqüentemente, os valores em locais mais próximos entre si são mais semelhantes, até um determinado limite, que aqueles tomados a maiores distâncias. Caso isto ocorra, os dados não podem ser tratados como independentes, e um tratamento estatístico mais adequado será necessário (EGUCHI, 2001).

Pesquisadores têm trabalhado com problemas de variabilidade, praticamente desde o início deste século, mas apenas recentemente surgiu uma ferramenta

compreensível para analisar e usar a variabilidade espacial, chamada geoestatística, e que, ultimamente, vem sendo intensamente usada em ciência do solo e em outras áreas agronômicas (VIEIRA et al., 1983; VIEIRA et al., 1987; VIEIRA et al., 1988; SILVA et al., 1989; MOURA et al., 1992; VIEIRA, 1997). A geoestatística surgiu na África do Sul, quando o engenheiro Krige, trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que não conseguia encontrar sentido nas variâncias, se não levasse em conta a distância entre as amostras (KRIGE, 1951). Dentre muitos autores que contribuíram para este estudo, atribuí-se a G. Matheron, no início da década de 60, na França, a apresentação e a formalização da teoria das variáveis regionalizadas, a qual é designada Geoestatística (CRESSIE, 1990).

É oportuna a observação de REICHARDT et al. (1986) de que a estatística clássica e a geoestatística, ou estatística espacial, se completam. Uma não exclui a outra, e perguntas não respondidas por uma, muitas vezes, podem ser respondidas pela outra. Sendo assim, a variabilidade espacial das variáveis pode ser estudada por meio das ferramentas da geoestatística, que se fundamenta na teoria das variáveis regionalizadas, segundo a qual os valores de uma variável estão, de alguma maneira, relacionados à sua disposição espacial e, portanto, as observações tomadas a curta distância se assemelham mais do que aquelas tomadas a distâncias maiores (VIEIRA et al., 1981; VAUCLIN et al., 1983).

### **- Semivariograma**

As ferramentas da geoestatística permitem a análise de dependência espacial, a partir do ajuste de semivariogramas experimentais a uma função simples, segundo um modelo matemático, e a caracterização da variabilidade espacial, por meio do mapeamento da variabilidade a partir da estimativa, sem tendenciosidade, de dados para locais não amostrados. Segundo VIEIRA (2000), para o ajuste de semivariogramas, a normalidade dos dados não é necessária, mas desejável. Caso a distribuição não seja normal, mas seja razoavelmente simétrica, podem-se admitir as hipóteses necessárias à construção do semivariograma.

O semivariograma define o tipo e a forma da associação espacial, e segundo VIEIRA et al. (1983), constitui-se no primeiro passo da análise geoestatística. O

semivariograma, com base nas pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca, pode ser estimado por:

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

em que  $\gamma^*(h)$  é a semivariância estimada a partir dos dados experimentais; Z são os valores medidos nos pontos  $x_i$  e  $x_i + h$ ; N(h) é o número de pares de pontos separados por uma distância h.

O semivariograma inicia-se num valor denominado variância pepita ( $C_0$ ) e cresce à medida que a semivariância aumenta, até uma distância denominada de alcance (a). O alcance determina a distância em que a propriedade apresenta dependência espacial (Figura 1).

Um dos parâmetros analisados através do semivariograma é a variância pepita ( $C_0$ ), que representa a variação não dependente espacialmente sobre o alcance examinado. Ela indica a variabilidade não explicada, podendo ser originada dos erros de medição ou de microvariações não detectadas quando é considerada a distância de amostragem utilizada (CAMBARDELLA et al., 1994; SALVIANO et al., 1998; OLIVEIRA et al., 1999).

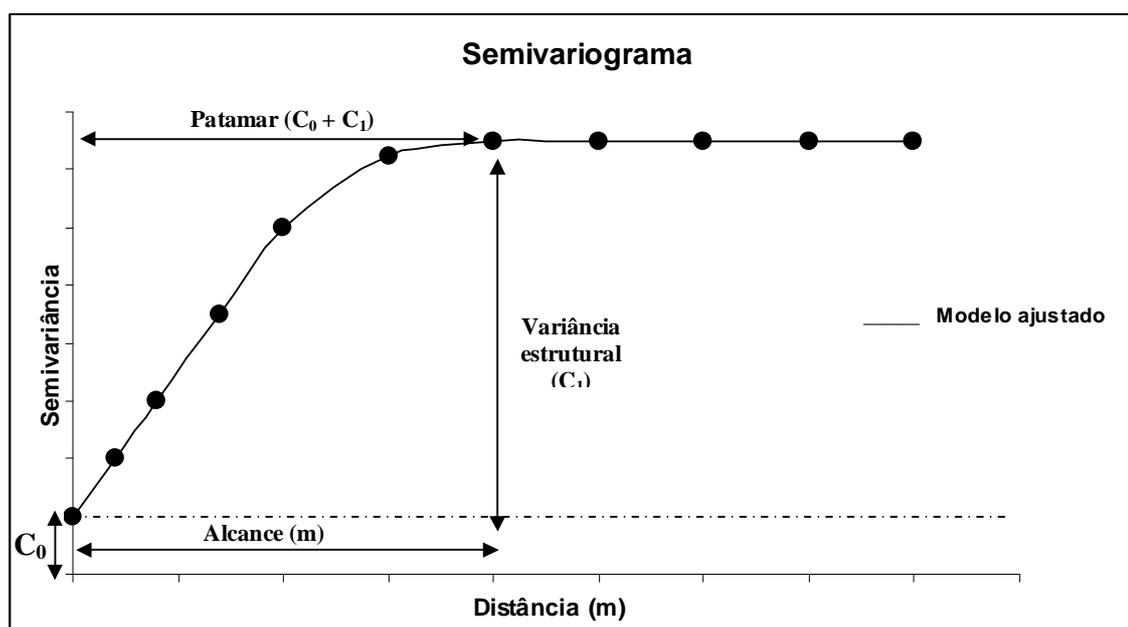


Figura 1. Semivariograma experimental de um atributo qualquer do solo.

O patamar do semivariograma ( $C_0+C_1$ ) representa a variância espacial independente, ou seja, dados separados por uma distância onde a semivariância não se modifica, são espacialmente independentes entre si (ISSAKS & SRIVASTAVA, 1989). A razão entre o efeito pepita ( $C_0$ ) e o patamar ( $C_0+C_1$ ) pode ser usada para definir classes distintas de dependência espacial das variáveis do solo, classificação segundo CAMBARDELLA et al. (1994), sendo:

- 1)  $C_0/(C_0+C_1) \leq 25 \%$ , variável apresenta forte dependência espacial;
- 2)  $C_0/(C_0+C_1)$  entre 25 % e 75 %, variável apresenta moderada dependência espacial;
- 3)  $C_0/(C_0+C_1) > 75 \%$ , variável apresenta fraca dependência espacial.

O alcance (a) na análise geoestatística é a distância até a qual o atributo do solo se apresenta espacialmente dependente, ou seja, é a distância na qual o semivariograma alcança o patamar. O alcance refere-se a distância de separação dentro da qual existe dependência espacial entre os pontos amostrados (ISSAKS & SRIVASTAVA, 1989). VIEIRA (1997) define o alcance da dependência espacial (a) como sendo um parâmetro importante no estudo do semivariograma e representa o raio de um círculo, dentro do qual os valores são tão parecidos uns com os outros que se tornam correlacionados.

Cada variável é submetida ao ajuste de modelos matemáticos para definir os semivariogramas. Todos os cálculos de geoestatística dependem do valor do modelo do semivariograma para cada distância especificada (VIEIRA et al., 1983). Por isso, se o modelo for mal ajustado, todos os cálculos seguintes estarão prejudicados. Desta forma, uma das melhores maneiras de se ajustar o modelo adequado é através da validação cruzada (RIBEIRO JUNIOR, 1995).

De acordo com RIBEIRO JUNIOR (1995), a validação cruzada consiste na retirada de um ponto do conjunto amostral de dados e estimar o valor deste ponto a partir dos restantes através da krigagem. É também estimada a variância da estimativa. Retorna-se o ponto ao conjunto e retira-se o seguinte, repetindo-se o processo para todos os pontos amostrados. Para cada ponto, é possível então obter o erro de estimação e padronizá-lo pelo desvio-padrão da estimação. Espera-se que o conjunto de erros padronizados tenha distribuição normal de média zero e variância unitária.

RIBEIRO JUNIOR (1995) ressalva é que a validação cruzada não está avaliando simplesmente o modelo escolhido para o semivariograma. Toda a modelagem do processo em questão está sendo posta a prova. Isto inclui a decisão de estacionaridade, os estimadores utilizados, o tratamento dos dados atípicos, o modelo de semivariograma adotado e a decisão relativa à anisotropia.

### **- Krigagem**

Conhecido o semivariograma do atributo e havendo dependência espacial entre as amostras, podem-se interpolar valores em qualquer posição no campo de estudo, sem tendência e com variância mínima. A este método, dá-se o nome de krigagem (VIEIRA, 2000).

Para a realização da krigagem, utilizam-se as informações obtidas no semivariograma para que se possam determinar os pesos otimizados que são usados para a estimativa de áreas não amostradas. Assumindo que o semivariograma é uma função da distância, os pesos mudam de acordo com a distribuição espacial das

amostras. O valor interpolado para os locais não amostrados é definido através da expressão:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Zx_i \dots \dots \dots (2)$$

onde,

$Z(x_0)$  = é o valor estimado em locais não amostrados ( $x_0$ );

$\lambda_i$  = é o peso atribuído a cada valor observado  $Z(x_i)$ ;

$n$  = é o número de pontos vizinhos usados na estimativa.

O termo krigagem é derivado do nome Daniel G. Krige, e, inicialmente, o método foi desenvolvido para solucionar problemas de mapeamentos geológicos. Mas seu uso expandiu-se com sucesso no mapeamento de solos (BURGESS & WEBSTER, 1980).

A diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. No caso de interpolação linear simples, por exemplo, os pesos são todos iguais a  $1/N$  ( $N$  = número de amostras); na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados. Na krigagem, o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, exceto que aqui os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece, em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínima. A condição de não-tendência significa que, em média, a diferença entre valores estimados e medidos para o mesmo ponto deve ser nula. A condição de variância mínima significa que, embora possam existir diferenças ponto por ponto entre o valor medido e o estimado, essas diferenças devem ser mínimas (FIETZ, 1998).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R.; REINERT D. J.; BLUME E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 275-282, 2003.

ALVES, A. J. O.; RIBEIRO, M. R. Caracterização e gênese dos solos de uma toposseqüência na microregião da mata seca de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v.19, p.297-305, 1995.

ANTONELLO, L. L. **Gênese de uma seqüência de solos de rochas alcalinas do maciço do Itatiaia, RJ: mineralogia geoquímica e micromorfologia**. 1983. 178 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 1983.

ASSIS, F. N.; ARRUDA, H. V.; PEREIRA, A. R. **Aplicações da estatística à climatologia**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 1996. 161 p.

BAHIA FILHO, A. F. C. **Índices de disponibilidade de fósforo em Latossolo do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas**. 1982. 179 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1982.

BARBIERI, D. M. **Influência das formas do relevo na variabilidade espacial de atributos de latossolos sob o cultivo de cana-de-açúcar**. 2004. 83 f. (Monografia em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.

BISCARO, A. S.; GARZELLA, T. C. Agricultura de precisão: uma valiosa ferramenta para redução de contaminação ambiental decorrente do uso de fertilizantes minerais nitrogenados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2006, São Pedro-SP. **Anais.....** Piracicaba: Esalq, 2006. 1 CD-ROM.

BORGGGAARD, O. K.; JÖRGENSEN, S. S.; MOBERG, J. P.; RABEN-LANGE, B. Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminium and iron oxides in sandy soils. **European Journal of Soil Science**, v. 41, n. 3, p. 443–449, 1990.

BOUMA, J.; FINKE, P. A. Origin and nature of soil resource variability. In: ROBERT, P. C. (Ed.). **Procedures of soil specific crop management: a workshop on research and development issues**. Madison: Soil Science Society of America, 1993. p.76-93 (Special Publication).

BOUMA, J.; STOOORVOGEL, J.; ALPHEN, B. J.; BOOLTINK, H. W. G. Pedology, precision agriculture, and the changing paradigm of agricultural research. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 6, p. 1763-1768, 1999.

BURGES, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal Soil Science**, Oxford, v. 31, n. 3, p. 315-331, 1980.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n.5, p. 1501-1511, 1994.

CAPELLI, N. L. **Agricultura de precisão - novas tecnologias para o processo produtivo**. LIE/DMAQAG/ FEAGRI/UNICAMP, 1999. Disponível em: <<http://wwwbases.cnptia.embrapa.br/cria/gip/gipap/capelli.doc>> Acesso em 15 out 2006.

CAREY, A. E. **Agriculture, Agricultural Chemicals, and Water Quality**. In: Agriculture and the Environment. p 78, 1991.

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

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S.. Spatial variability of soil characteristics under grapevine in Vitoria Brasil (State of Sao Paulo - Brazil). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa , v. 27, n. 4, p. 695-703, 2003.

CARVALHO, T. M. **Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de em um latossolo vermelho-amarelo através da geoestatística**. 1991. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1991.

CARVALHO, W. A. **Relações entre relevo e solos da bacia do Rio Capivara – município de Botucatu, SP**. 1981. 193 f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas - Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 1981.

CASTRO, S. S. **Sistemas de transformação pedológica em Marília, SP: B latossólicos e B texturais**. 1989. 274 f. Tese (Doutorado em Solos) – Faculdades de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1989.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. 10 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1990. 264 p.

CRESSIE, N. The origins of kriging. **Math. Geol.**, v. 22, p. 239-252, 1990.

CURI, N.; CAMARGO, O. A.; GUEDES, G. A. A. & SILVEIRA, J. V. Sorção de fósforo em materiais de Latossolos do Brasil sudeste. In: Reunião de Classificação, Correlação de Solos e Interpretação de Aptidão Agrícola, 3., 1988, Rio de Janeiro, **Anais....** Rio de Janeiro, Embrapa, 1988. p.267-282, 1988.

DAINESE, R. C.; ADAMI, M.; MOLIN, J. P. MOREIRA, M. A. Uso do spring no processamento de dados de fertilidade do solo para uso em agricultura de precisão. In: XI SBSR, 9., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 51-58.

DANIELS, R.B.; HAMMER, R.D. **Soil geomorphology**. New York: John Wiley, 1992. 236 p.

DICK, D. P. **Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes B latossólicos**. 1986. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1986.

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

EGUCHI, E. S. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos de um solo hidromórfico no município de Lavras-MG**. 2001. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

EWG – **Environmental Working Group**. <<http://www.ewg.org/>> Acesso 20 de mar. 2006.

FARIAS, M. S. S. **Diagnóstico da necessidade de drenagem no perímetro irrigado de São Gonçalo**. 1999. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999.

FATORGIS. **Agricultura de precisão: a tecnologia de GIS/GPS chega às fazendas**. Curitiba, 1998. Disponível <<http://www.fatorgis.com>> Acesso em :19 Jul. 1999.

FIETZ, C. R. **Variabilidade espacial do armazenamento de água no solo visando o manejo da irrigação por aspersão**. 1998. 97 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba-SP, 1998.

FITZPATRICK, R. W. & SCHWERTMANN, U. Al-substituted goethite – An indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. **Geoderma**, Amsterdam, v. 27, p. 335-347, 1982.

FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 72, p. 37-51, 1996.

GONÇALVES, A. C. A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação**. 1997. 118 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

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

GROSSI SAD, J. H. **Fundamentos sobre variabilidade dos depósitos minerais**. Rio de Janeiro: DNPM/CPRM - GEOSOL, 1986. 141 p.

HAMMOND, M. W. Comparison of phosphorus and potassium utilization with conventional and variable fertility management. **Better Crops With Plant Food**, Norcross, v. 78, n. 4, p. 22-23, 1994.

HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil Fertility and Fertilizers** - An Introduction to Nutrient Management. Sixth edition. 1999.

HEREDIA, O. S.; CIRELLI, A. F. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity. **Geoderma**, Amsterdam, v.137, p. 426–431, 2007.

HSU, P. H. Aluminium oxides and oxyhydroxides. In: DIXON, J. B. & WEED, S. B. (eds). **Minerals in soil environments**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 331- 378.

IEMMA, A. F. **Estatística descritiva**. Piracicaba: Publicações, 1992. 182 p.

ISSAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **A introduction to applied geostatistics**. Oxford: University Press, 1989. 561 p.

JUO, A. S. R.; FOX, R. L. Phosphate sorption characteristics of some bench-mark soils of West Africa. **Soil Science**, Baltimore, v. 124, p. 370– 376, 1977.

KACHANOSKI, R. G.; O'HALLORAN, I. P.; ASPINALL, D.; BERTOLDI, P. V. Delta yield: mapping fertilizer nitrogen requirement for crops. **Better Crops with Plant Food**, Atlanta, v. 80, n. 1, p. 20-23, 1996.

KÄMPF, N.; RESENDE, M.; CURI, N. Iron oxides in Brazilian soils. In: INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP, 8, 1988, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Universidade Federal do Paraná, 1988. p. 71-77.

KER, J. C. **Caracterização química, física, mineralógica e micromorfológica de solos brunos subtropicais**. 1988. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **J. Chem. Metall. Min. Soc. S. Afr.** v.52, p.119-139, 1951.

LEAL, J. R.; VELOSO, A. C. X. Phosphate adsorption in latosols under Cerrado vegetation. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v .8, p. 81– 88, 1973.

LEÃO, M. G. A. **Relação entre atributos de uma vertente com Latossolos e qualidade de fruta cítrica**. 2004.119 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal-SP, 2004.

LI, H.; LASCANO, R. J.; BOOKER, J.; WILSON, L. T.; BRONSON, K. F. Cotton lint yield variability in a heterogeneous soil at a landscape scale. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 58, n. 3-4, p. 245-258, 2001.

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

LOWENBERG-DEBOER, J.; SWINTON, J. V. **Economics of site-specific management in agronomic crops**. W. Lafayette: Purdue University, 1995. p. 25 (Staff Paper, 5-14).

MACHADO, R. V. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos em uma hidroseqüência de solos bem à muito mal drenados**, 1994. 88 f. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1994.

MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I. F. Depósitos superficiais neocenozóicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. **Geociência**, São Paulo, v.19, n.2, p.90-106, 2000.

MATTOSO, M. J.; GARCIA, J. C. Análise econômica da agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2006, São Pedro-SP. **Anais...** Piracicaba: Esalq, 2006. 1 CD-ROM.

MEAD, R.; CURNOW, R. W. **Statistical methods in agriculture and experimental biology**. New York: Chapman and Hall Publisher, 1983. 163 p.

MENEGATTI, L. A. A. ; MOLIN, J. P.; GÓES, S. L. 3 ; KORNDORFER, G. H.; SOARES, ROGÉRIO, A. B.; LIMA, E. A. Benefícios econômicos e agronômicos da adoção de agricultura de precisão em usinas de açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2006, São Pedro-SP. **Anais...** Piracicaba: Esalq, 2006. 1 CD-ROM.

MESQUITA FILHO, M. V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from Cerrado Region (Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v.58, p.107-123, 1993.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. Parte 2: diagnóstico, aplicação localizada e considerações econômicas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 17, n. 2, p. 108-121, 1997.

MOLIN, J.P. **Agricultura de Precisão**: o gerenciamento da variabilidade. Piracicaba, 2001.

MOLIN, J. P. Tendências da agricultura de precisão no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Esalq, 2004. 1 CD-ROM.

MONIZ, A. C.; MANFREDINI, S.; DEMATTÊ, J. L. I. Variações morfológicas, mineralógicas e hídricas em terra roxa estruturada ao longo de uma vertente em Rio das Pedras (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.18, p.513-520, 1994.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n.1, p. 69- 77, 2005.

MONTEZANO, Z. F. CORAZZA, E. J.; MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homoganeamente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 839-847, 2006.

MOTTA, P.E.F.; CURI, N.; SIQUEIRA, J.O.; VAN RAIJ, B.; FURTINI NETO, A.E.; LIMA, J.M. Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: influencia da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 349-359, 2002.

MOURA, E. G.; VIEIRA, S. R.; CARVALHO, A. M. Avaliação da capacidade de aeração e de água disponível dos solos de duas transeções na baixada ocidental Maranhense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, p. 7-18, 1992.

NOVAIS, R. F. & SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

O Estado de S.Paulo – “**Os novos horizontes da cana**”, 8/nov/2005

POCAY, V.G. **Relações entre pedoforma e variabilidade espacial de atributos de latossolos sob cultivo intensivo de cana-de-açúcar**. 2000. 177 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual de São Paulo. Jaboticabal, 2000.

QUEIROZ, J.E. **Parâmetros hidrodinâmicos para um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea**. Piracicaba, 1995. 167 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. 343 p.

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

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial dos parâmetros do solo**.1995. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

ROLIM NETO, F. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; COSTA, L. M.; CORRÊA, M. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; IBRAIMO, M. M. Adsorção de fósforo, superfície específica atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 953-964, 2004.

SALVIANO, A.A.C. **Variabilidade de atributos de solo e de Crotalaria juncea em solo degradado do município de Piracicaba-SP**. 1996. 91 f. Tese (Doutorado) -

Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

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

SANCHEZ, R. B. **Zonas de manejo caracterizadas por meio de pedoformas em áreas sob o cultivo de cana-de-açúcar**. 2003. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

SCHAEFER, C.E.G.R.; GILKES, R.J.; FERNANDES, R.B.A. EDS/SEM study on microaggregates of Brazilian Latosols, in relation to P adsorption and clay fraction attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, p.1-33, 2004.

SCHWERTMANN, U. Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments. In: STUCKI, J. W.; GOODMAN, B. A.; SCHWERTMANN, V. **Iron in soils and clay minerals**. Dordrecht, Reidel Publishing Company, 1988. p. 267-308.

SILVA, A.P. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo**. 1988. 105 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; VIEIRA, S. R. Variabilidade da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Escuro ao longo de uma transeção. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.13, p.1-5, 1989.

SILVA, M. B.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; NASCIMENTO, R. A. M. Estudo de toposseqüência da baixada litorânea fluminense: efeitos do material de origem e posição topográfica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v.25, p.965-976, 2001.

SILVEIRA JR., P.; MCHADO, A. A.; ZONTA, E. P.; SILVA, J. B. **Curso de estatística I**. Pelotas: Editora Universitária - Universidade Federal de Pelotas, 1989. 135 p.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; GONZÁLEZ, A. P. Análise da hipótese intrínseca da geostatística. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2006, São Pedro-SP. **Anais...** Piracicaba: Esalq, 2006. 1 CD-ROM.

SOBIERAJ, J.A.; ELSENBEER, H.; COELHO, R.M.; NEWTON, B. Spatial variability of soil hydraulic conductivity along a tropical rainforest catena. **Geoderma**, Amsterdam, v. 108, p. 79-90, 2002.

SOUZA, L. C. **Variabilidade espacial da salinidade de um solo aluvial no semi-árido paraibano. Campina Grande**, 1999. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1999.

SOUZA, Z. M. **Variabilidade espacial e atributos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo**. 2004. 141 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg, e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.6, p.1763-1771, 2004.

SOUZA, Z. M., MARQUES JUNIOR, José, PEREIRA, G. T., BARBIERI, D. M. Effects of relief shapes on soil chemical properties of a oxisol cultivated with sugar cane. **Scientia Agricola**. Piracicaba, v.63, n. 2, p.161 - 168, 2006a.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA G. T.; MONTANARI R. Otimização amostral de atributos de latossolos considerando aspectos solo-relevo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, 2006b.

SPIEGEL, M.R. **Estatística**. 3 ed. São Paulo: Mkron Books, 1993. 643 p.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University, 1989. 277 p.

STONE, M. L.; SOLIE, J. B.; RAUN, W. R.; TAYLOR, S. L.; RINGER, J. D.; WHITNEY, R. W. Use of spectral radiance for correcting in season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. **St. Joseph: ASAE** 1995. p.37. (Paper AECT, 95-133).

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v.38, n.1, p.45-93, 1985.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **American Journal of Science**, New Haven, v. 263, n. 3, p. 616-627, 1965.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n.1, p.159-163, 2002.

VAIDYA, P. H.; PAL, D. K. Microtopography as a factor in the degradation of Vertisols in central India. **Land Degradation & Development**, Sussex, v. 13, n. 5, p. 429-445, 2002.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; VACHAUD, G.; NIELSEN, D. R. The use of cokriging with limited field soil observations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p.175-184, 1983.

VEITH, J.A., SPOSITO, G. Reactions of aluminosilicates, aluminium hydrous oxides, and aluminum oxide with o-phosphate: the formation of X-ray amorphous analogs of variscite and montebasite. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 41, p. 870–876, 1977.

VIDAL-TORRADO, P. **Pedogênese e morfogênese no distrito de Tupi (Piracicaba-SP)**. 1994. 212 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 1994.

VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v.56, n.1, p.181-190, 1997.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-53.

VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n.6, p.1040-1048, 1981.

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

VIEIRA, S. R.; DE MARIA, I. C.; CASTRO, O.M.; DECHEN. S. C. F.; LOMBARDI NETO, F. Utilização das análises de Fourier no estudo do efeito residual da adubação em uva na crotalária. **Revista Brasileira Ciência do. Solo**, Campinas, v.11, n.1, p.7-10, 1987.

VIEIRA, S. R.; REYNOLDS, W. D.; TOPP, G. C. Spatial variability of hydraulic properties in a highly structured clay soil. In: WIERANGA, P. J.; BACHELET, D.; (Ed.) **Validation of flow and transport models for the unsaturated zone**. Las Cruces: Department of Agronomy and Horticulture, New Mexico State University, 1988. p. 471-483. (Research Report, 88-SS-04).

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. cap. 2, p. 319-344.

WARRICK, A.W. Spatial Variability. Appendix 1, **Environmental Soil Physics**. Edited by Daniel Hillel. San Diego, California, 655 p. 1998

WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. **Statistical methods in soil and land resource survey**. Oxford: Oxford University Press, 1990. 316 p.

WOLLENHAUPT, N. C.; WOLKOWSKI, R. P. Cost associated with variable rate phosphorus and potassium applications. **Better Crops With Plant Food**, Norcross, v.78, n.4, p.8-9, 1994.

ZASLAVSKY, D., ROGOWSKI, A. S. Hydrologic and morphologic implications of anisotropy and infiltration in soil profile development. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.33, p.594-599, 1969.

ZEBARTH, B.J.; REES, H.; WALSH, J.; CHOW, L.; PENNOCK, D.J. Soil variation within a hummocky podzolic landscape under intensive potato production. **Geoderma**, Amsterdam, v.110, p.19-33, 2002.

## **CAPÍTULO 2- CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM ÁREAS COM MESMO HISTÓRICO DE MANEJO E DIFERENTES POSIÇÕES NA PAISAGEM**

RESUMO - O fósforo é um dos principais fatores limitantes ao desenvolvimento da cultura e longevidade do canavial. O teor e a constituição mineralógica da fração argila assumem papel importante na caracterização de um solo como dreno ou fonte de fósforo, sendo que a gibsita quando presente em altas quantidades no solo, pode passar a ser a maior responsável pelo menor teor de fósforo disponível. Portanto o presente trabalho teve por objetivo a caracterização química e mineralógica e a adsorção máxima de fósforo de um Argissolo com mesmo histórico de manejo, porém em diferentes locais da paisagem. Duas parcelas de um hectare foram delimitadas em área côncava e convexa. Foram retiradas 121 amostras em cada área. Os dados foram submetidos às análises da estatística descritiva e da geoestatística. A formação dos minerais da fração argila é condicionada pelas variações do relevo, sendo a área convexa um ambiente mais favorável à formação da gibsita do que a área côncava. Os menores valores médios de fósforo encontram-se na área convexa na qual estão presentes as maiores relações Gb/Gb+Ct, ou seja, os maiores teores de gibsita e os maiores valores de capacidade máxima de adsorção de fósforo.

## INTRODUÇÃO

O baixo teor de P disponível no solo é a limitação nutricional mais generalizada na produção agrícola (LOMBI et al., 2006; JOHNSON & LOEPPERT, 2006) de solos intemperizados, e a maioria das culturas no Brasil apresenta reposta à aplicação do nutriente. Entretanto, é baixa a eficiência da adubação fosfatada, pois grande parte do P adicionado torna-se imóvel ou não-disponível, em virtude de reações de adsorção em colóides minerais, precipitação ou conversão em formas orgânicas (BUSATO et al., 2005; RHEINHEIMER & ANGHINONI, 2001; TIESSEN & MOIR, 1993;).

ROLIM NETO et al. (2004) ressaltam que, para a maioria dos solos brasileiros, o suprimento natural de fósforo é insatisfatório ao adequado crescimento das plantas. Mesmo sendo um elemento presente em grandes quantidades, o fósforo disponível na solução do solo é apenas 0,1% do total existente. Este fenômeno ocorre graças às mudanças para formas não-lábeis (fixação), quando fonte solúvel de fósforo na forma de fertilizantes e resíduos orgânicos é adicionada ao solo formando compostos não-reativos, e do total de fertilizante aplicado, somente uma pequena fração pode ser absorvido pelas plantas no ano da aplicação.

O teor e a constituição mineralógica da fração argila assumem papel importante na caracterização de um solo como dreno ou fonte de fósforo. Desta forma, solos muito intemperizados, com elevado teor de argila, exercerão predominantemente a função de drenos, enquanto aqueles pouco intemperizados exercerão papel de fontes (SCHAEFER et al., 2004 ; NOVAIS & SMYTH, 1999).

MOTTA et al. (2002), avaliando a influência da mineralogia na adsorção de fósforo em Latossolos, verificaram que a adsorção, o teor total e as forma de P ligadas mais fortemente a Al e Fe aumentaram com o caráter oxidico dos solos. Nesse aspecto, os óxidos de Fe e Al da fração argila dos solos são considerados os principais responsáveis pela adsorção de fósforo (ULÉN & SNÄLL, 2007; JOHNSON & LOEPPERT, 2006; FONTES & WEED, 1996; BLOOM, 1981; BORGGARD et al., 1990; BÖRLING et al., 2001), sendo a goetita a mais efetiva (MOTTA et al., 2002).

Porém MOTTA et al. (2002), BAHIA FILHO (1982), DICK (1986), CURI et al. (1988) e MESQUITA FILHO & TORRENT (1993) ressaltam que, em solos com altos

teores de gibsitita, a contribuição deste mineral na adsorção de fósforo pode ser igual ou superior à contribuição da goetitita. SCHAEFER et al. (2004) e ROLIM NETO et al. (2004), estudando a relação entre a mineralogia de Latossolos e a capacidade máxima de adsorção de fósforo, encontraram maior correlação positiva entre a adsorção máxima de fósforo e o teor de gibsitita, do que entre adsorção de fósforo e a goetitita, demonstrando a importância dos óxidos de alumínio neste fenômeno.

ROLIM NETO et al. (2004) encontraram correlação positiva e significativa entre os teores de argila e os teores de gibsitita, indicando indiretamente a participação deste mineral na adsorção de fósforo, reforçando a idéia de que a qualidade da argila é mais importante do que seus teores.

Segundo KÄMPF & CURI (1990), as condições ideais para a formação da gibsitita são clima tropical (quente e úmido) e boa drenagem; estas condições promovem rápida mineralização da matéria orgânica. Este fato é de grande importância, pois altos teores de matéria orgânica retardam ou inibem a cristalização dos hidróxidos de alumínio. BORGGGAARD et al. (1990) concluíram que as variações na adsorção máxima de fósforo poderiam ser explicadas pelos óxidos mal cristalizados de alumínio e de ferro, e que a matéria orgânica afetou indiretamente a adsorção de fósforo inibindo a cristalização do óxido de alumínio.

A posição na paisagem e a declividade do solo criam um padrão complexo de transporte de água e solutos atuando no desenvolvimento do solo (MARQUES JÚNIOR & LEPSCH, 2000). Portanto, diferentes posições da paisagem podem auxiliar grandemente na definição de zonas de manejo (SADLER et al., 1998; BOUMA et al., 1999), por condicionar condições específicas de reações químicas e desenvolvimento dos atributos do solo, dentre os quais a quantidade, forma de cristalização e distribuição espacial dos minerais da fração argila que, por sua vez, podem alterar o comportamento dos atributos do solo (GHIDIN et al., 2006a; SOUZA, 2004).

O comportamento dos atributos químicos e mineralógicos do solo, associado às características da paisagem, é de fundamental importância para as práticas de manejo do solo, pois as diferentes formas da paisagem criam condições específicas para a formação de determinados minerais da argila fração argila que, por sua vez, interferem nos atributos químicos do solo e determinam diferentes variabilidades espaciais. Neste

sentido, o presente trabalho teve por objetivo investigar as relações entre a ocorrência de caulinita e gibsita da fração argila com a adsorção de P em Argissolos em diferentes formas do relevo e mesmo histórico de manejo.

## **MATERIAL E METODOS**

A área de estudo está inserida na província geomórfica do Planalto Ocidental Paulista. O clima da região foi classificado, pelo método de Köppen, como tropical quente úmido, tipo Aw, seco no inverno, com precipitação média de 1.350 mm, temperatura média anual de 23°C, com temperatura no mês mais quente superior a 22 °C e a do mês mais frio inferior a 18 °C, e umidade relativa do ar de 74%. A vegetação primária da região de Catanduva foi classificada como floresta pluvial estacional de cerrado, sendo utilizada atualmente para o cultivo de cana-de-açúcar (SANCHEZ, 2003). Os materiais de origem dos solos foram mapeados como rochas areníticas sedimentares do Grupo Bauru, Formação Adamantina (IPT, 1981). Os solos da área de estudo foram classificados como Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico textura média/argilosa (EMBRAPA, 1999). Os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  são 20 g  $\text{kg}^{-1}$  e 38 g  $\text{kg}^{-1}$  na área côncava e 24 g  $\text{kg}^{-1}$  e 36 g  $\text{kg}^{-1}$  na área convexa, respectivamente.

Nesta mesma área, por meio de tradagem, SANCHEZ (2003) realizou a determinação do horizonte A+E em 188 pontos, sendo que a espessura média encontrada foi de 0,40 m na área côncava e de 0,32 m na área convexa.

Esta área está localizada na região de Catanduva – SP, e tem sido utilizada há mais de 20 anos com a cultura da cana-de-açúcar. As coordenadas geográficas são: Latitude 21°05'S e Longitude 49°01'W. O mapeamento da área foi realizado utilizando-se equipamento de posicionamento global (GPS). Elaborou-se o modelo de elevação digital (Figura 1) que, juntamente com as atividades de campo, possibilitou a identificação e a separação das formas do terreno e sua posterior classificação geomorfológica, conforme TROEH (1965). De acordo com esta classificação, duas áreas foram delimitadas, sendo uma côncava e outra convexa.

Duas parcelas de um hectare foram delimitadas, sendo que uma parcela está localizada numa área côncava e a outra numa área convexa. Uma malha de

espaçamento de 10 x 10 m foi confeccionada em cada uma das parcelas, e os pontos localizados nos cruzamentos das malhas foram georreferenciados. Os solos foram amostrados, perfazendo um total de 121 pontos em cada malha, sendo que as amostras de solos foram coletadas nas profundidades de 0,0-0,2 m; 0,2-0,4 m. As amostras coletadas foram levadas ao laboratório da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias/UNESP/Jaboticabal e submetidos à análise química.

A acidez potencial (H+Al) foi obtida segundo RAIJ et al. (2001). O cálcio (Ca), o magnésio (Mg), o potássio (K<sub>2</sub>O), o fósforo disponível (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e a matéria orgânica foram extraídos utilizando o método da resina trocadora de íons proposta por RAIJ et al. (2001). Com base nos resultados das análises químicas, foi calculada a capacidade de troca catiônica (CTC).

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação, por 16 horas, seguindo metodologia proposta pela EMBRAPA (1997). A fração argila foi separada por sedimentação. A CTC da argila foi calculada com base na CTC do solo e na quantidade de argila do solo.

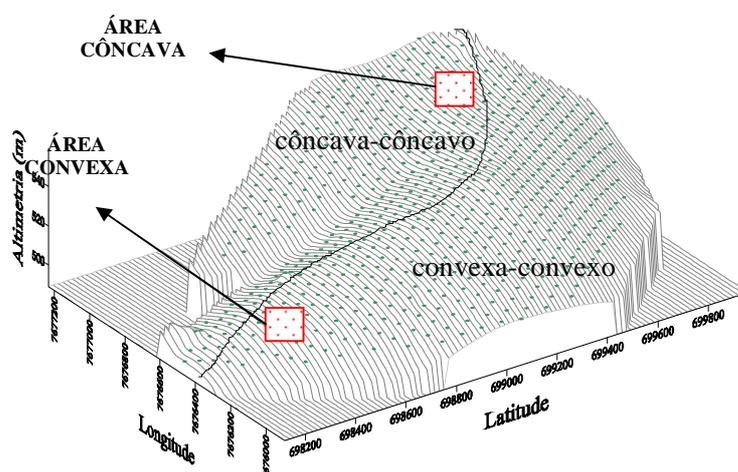


FIGURA 1. Modelo de elevação digital do terreno e localização das áreas côncava e convexa (Figura extraída de SANCHEZ, 2003).

O histórico de manejo das duas áreas é idêntico, e a variedade de cana-de-açúcar plantada é a SP801842, sendo que o plantio da cana foi realizado em 2003. A adubação de plantio foi realizada com 700 litros ha<sup>-1</sup> da fórmula 04-12-10, sendo na adubação de cana soca utilizado 600 litros ha<sup>-1</sup> da fórmula 10-00-10. Torta de filtro e vinhaça não são aplicados nas áreas.

O sistema caulinita-gibsite foi avaliado no Laboratório de Mineralogia do Solo da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias/UNESP/Jaboticabal, em 121 amostras da fração argila desferrificada, por difração de raios X (DRX), pelo método do pó (CAMARGO et al., 1986). O difratômetro utilizado foi o HZG – 4/B, empregando-se cátodo de cobre com filtro de níquel e radiação  $k\alpha$  (20 mA, 30 Kv). A velocidade de varredura empregada foi de 1°2 $\theta$ /minuto. A razão gibsite/(gibsite+caulinita) [Gb/(Gb+Ct)], foi calculada empregando-se as áreas dos reflexos da caulinita [Ct (001)] e da gibsite [Gb (002)]. O diâmetro médio do cristal (DMC) da caulinita e gibsite foi calculado a partir da largura à meia altura (LMA) e da posição de reflexos dos minerais Ct (001) e Gb (002), usando a equação de Scherrer (SCHULZE, 1984). A razão Ct / (Ct + Gb) foi avaliada após o cálculo das áreas dos reflexos da Ct (001) e Gb (002) nos difratogramas.

Foram escolhidos seis pontos de cada área para a realização do ensaio da capacidade máxima de adsorção de fósforo que foram realizados no Laboratório de Química do Solo na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/ ESALQ. Foram pesados 2,0 g de terra fina seca ao ar e transferida para tubo de centrífuga de 50 mL. Adicionaram-se 20 mL de solução 0,005 mol L<sup>-1</sup> de CaCl<sub>2</sub> contendo KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> nas concentrações de 100; 200; 400; 800 e 1.600 mg L<sup>-1</sup> de fósforo e controle sem adição de fósforo. Foi utilizada relação solo:solução 1:10. As amostras contendo as soluções de fósforo foram agitadas por 24 horas à temperatura constante. Após agitação, procedeu-se à centrifugação a 2.500 rotações por minuto (rpm), por 15 min. O sobrenadante foi coletado para posterior determinação da concentração de fósforo em equilíbrio por meio de espectrofotômetro, de absorção molecular. Para determinação de fósforo no espectrofotômetro foi transferida alíquota de 1 mL para tubo de ensaio, adicionando-se 50 mL de solução sulfomolibdica e três gotas de solução com 200 g L<sup>-1</sup>

de ácido ascórbico. Esta solução foi agitada individualmente por 30 segundos e permaneceu em repouso por 15 min. O comprimento de onda selecionado no espectrofotômetro foi de 650 nm, o qual corresponde ao pico de máxima absorção pelo complexo formado. A quantidade de fósforo adsorvida pelo solo foi calculada subtraindo-se o valor determinado em solução da quantidade total adicionada. A partir dos resultados obtidos, foi realizado a linearização da equação de Langmuir, sendo obtidos os coeficientes inerentes a cada equação, sendo um destes coeficientes a capacidade máxima de adsorção de fósforo.

Os atributos químicos e mineralógicos do solo foram submetidos à análise estatística descritiva, obtendo-se média, mediana, coeficiente de variação, assimetria e curtose, e tipo de distribuição dos dados, com o uso do pacote estatístico SAS (SCHLOTZHAVER & LITTELL, 1997). Aplicou-se o teste de Tukey para comparação de médias entre as variáveis estudadas. Posteriormente, foram realizadas análises geoestatísticas através da construção de semivariogramas com o auxílio do programa GS<sup>+</sup> (ROBERTSON, 1998). A análise do grau de dependência espacial dos atributos foi realizada segundo CAMBARDELLA et al. (1994), em que são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm um efeito pepita menor ou igual a 25 % do patamar, moderada entre 25 % e 75 %, e fraca quando for maior que 75 %.

## **RESULTADO E DISCUSSÃO**

Para fins de avaliação dos atributos cristalográficos, foram avaliados os reflexos dos minerais Ct (001) e Gb (002) em 242 amostras, cujos difratogramas de três amostras de cada área estão apresentados na Figura 2. Pelos difratogramas, percebe-se a presença de maior quantidade de gibsita na área convexa. Isto se evidencia pela presença de picos bem definidos nesta área, enquanto, na área côncava, os picos da gibsita apresentam-se mal definidos ou até inexistentes (Figura 2).

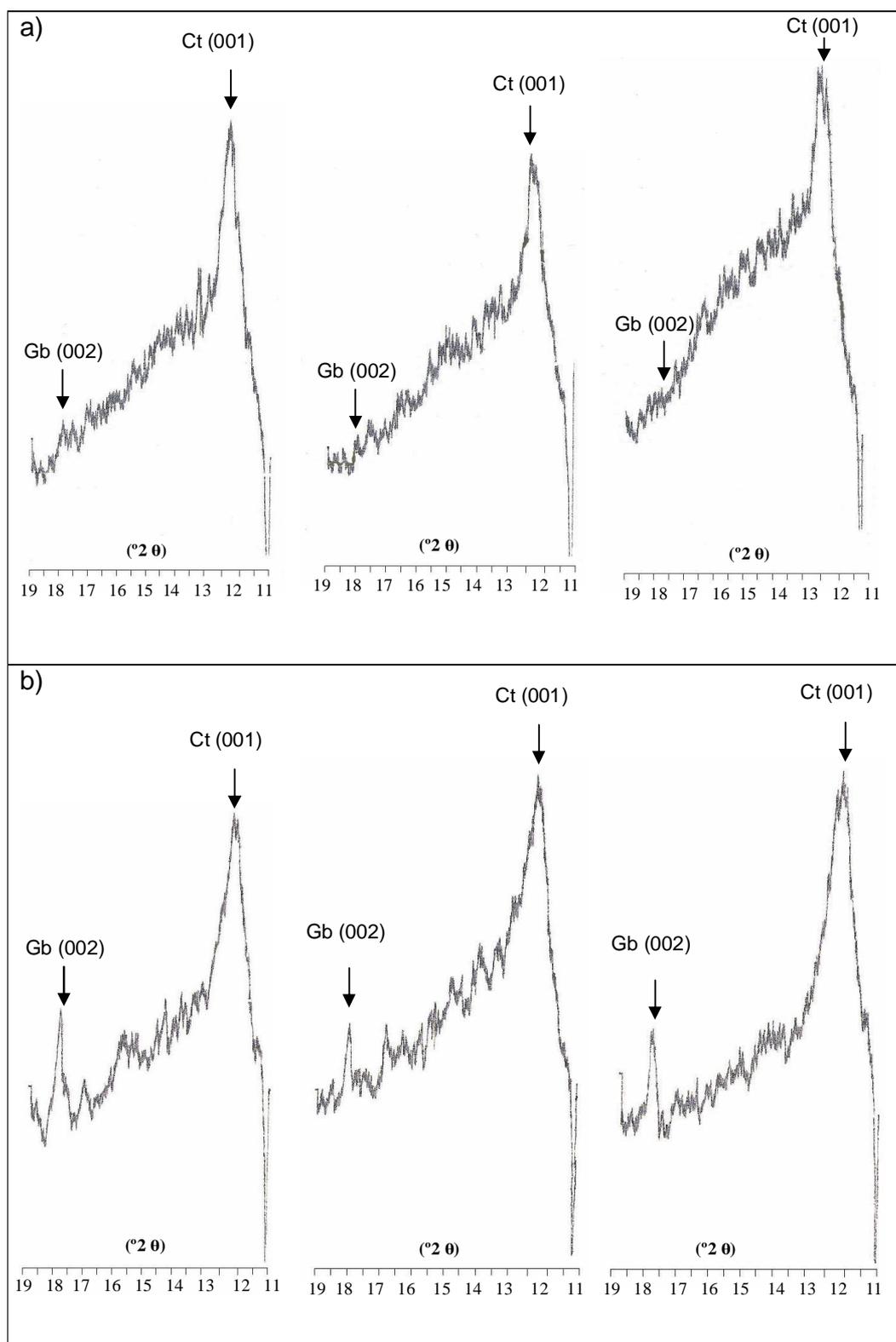


Figura 2. Difratogramas das amostras das áreas côncava (a) e convexa (b).

Os resultados da estatística dos valores dos atributos cristalográficos avaliados nos difratogramas e dos atributos químicos das amostras, nas duas profundidades, podem ser observados nas Tabelas 1 e 2. Os valores das áreas dos picos da caulinita - Ct (001) (KOPPI & SKJEMSTAD, 1981) variaram de 0,11 a 3,23 cm<sup>2</sup> na área côncava e de 0,8 a 2,79 cm<sup>2</sup> na área convexa (Tabela 1).

CUNHA (2000), estudando as diferenças mineralógicas dos atributos em diferentes locais da vertente, encontrou valores de área de pico da caulinita variando de 0,65 a 1,80 cm<sup>2</sup> em Latossolos Vermelhos distróficos e eutroféricos em Jaboticabal. Já para a gibsita, as áreas dos picos oscilaram de 0,01 a 0,28 cm<sup>2</sup> na área côncava e de 0,02 e 0,44 cm<sup>2</sup> na área convexa, sendo estes valores menores que os apresentados pelo mesmo autor.

Comparando as médias das áreas dos picos da caulinita e da gibsita nos dois compartimentos estudados, observam-se diferenças significativas pelo teste de t para a gibsita e não significativas para a caulinita. Esses resultados demonstram a maior presença de gibsita na área convexa, e menores da caulinita, que se apresenta em quantidades muito semelhantes nas duas áreas em estudo (Tabela 1).

A LMA da caulinita apresentou valores variando de 0,33 a 0,83 °2θ na área côncava e de 0,38 a 0,87 °2θ na área convexa GHIDIN et al. (2006), estudando toposseqüência de Latossolos encontraram valores de LMA para este mineral entre 0,55 e 0,85 °2θ. Já para a gibsita, os valores de LMA encontrados foram de 0,07 a 0,45 °2θ na área côncava e de 0,09 a 0,33 °2θ na área convexa. Valores variando de 0,283 a 0,394 °2θ foram encontrados por GHIDIN et al. (2006) para a LMA da gibsita. MELO et al. (2001), trabalhando com amostragem de doze classes de solos de quatro estados brasileiros com diferentes formações geológicas, obtiveram valores de LMA da gibsita entre 0,040 e 0,274 °2θ. No caso da LMA, observando-se as médias encontradas para os atributos em questão, percebe-se, comparando as duas áreas, que houve diferença significativa para a caulinita e não-significativa para a gibsita.

Analisando-se os valores médios do DMC da caulinita e da gibsita, observa-se que assim como para LMA, os valores da caulinita apresentam diferença significativa entre as duas áreas, enquanto para a gibsita não houve diferença estatística. Isto demonstra que a caulinita está melhor cristalizada na área côncava, ou seja, apresenta

crístais com menor superfície específica e menor capacidade de adsorção de fósforo do que os crístais da área convexa, que são menores, apresentam maior superfície específica e maior capacidade de adsorver fósforo. Os valores do DMC da caulinita variaram de 13 a 38 nm na área cônica e de 9 a 31 nm na área convexa. Já a gibsita variou de 19 a 466 nm na área cônica e de 6 a 407 nm na área convexa. SOUZA (2004), estudando mineralogia em diferentes posições da paisagem, encontrou para o DMC da caulinita valor médio de 25 nm e para a gibsita de 640 nm.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos mineralógicos na profundidade de 0,20-0,40 m.

Parâmetros	Área	Média	Mediana	Mín.	Máx.	p <sup>1</sup>	Coeficientes		
							Var. (%)	Assimetria	Curtose
<b>0,20-0,40 m</b>									
Área do pico (Ct) (cm <sup>2</sup> )	Cônica	1,66a	1,63	0,11	3,23	0,15	32	0,35	0,69
	Convexa	1,77a	1,73	0,80	2,79	0,11	25	0,16	-0,70
Área do pico (Gb) (cm <sup>2</sup> )	Cônica	0,11a	0,12	0,01	0,28	0,15	53	0,49	-0,504
	Convexa	0,24b	0,23	0,02	0,44	0,15	36	0,14	-0,32
LMA Ct (°2θ)	Cônica	0,56a	0,57	0,33	0,83	0,08	18	0,49	-0,06
	Convexa	0,64b	0,65	0,38	0,87	0,15	16	-0,09	-0,66
LMA Gb (°2θ)	Cônica	0,22a	0,21	0,07	0,45	0,01	40	0,52	0,06
	Convexa	0,21a	0,20	0,09	0,33	0,12	23	0,24	-0,50
DMC Ct (nm)	Cônica	23b	21,00	13,0	38,0	0,01	25	0,25	-0,71
	Convexa	19 a	18,00	9,0	31,0	0,01	25	0,70	0,05
DMC Gb (nm)	Cônica	171a	204	19,9	466	0,01	63	0,79	0,103
	Convexa	190a	204	6,00	407	0,01	47	0,34	-0,01
Gb/(Gb+Ct)	Cônica	0,06a	0,06	0,16	0,00	0,10	4	-0,648	-0,074
	Convexa	0,12b	0,12	0,23	0,00	0,15	5	-0,03	0,13

<sup>1</sup>p = nível mínimo de significância do teste de Kolmogorov-Smirnov, p<0,05 significância a 5%, p<0,01 significância a 1%, p>0,05 não significativo. Mín=mínimo, Máx=máximo, Var=variação. As médias dos atributos do solo, acompanhadas da mesma letra, são estatisticamente iguais entre si, pelo teste t (student). LMA =largura a meia altura, DMC =diâmetro médio do cristal, Gb/(Gb+Ct) =relação gibsita/(gibsita+ caulinita).

Os valores da relação Gb/(Gb+Ct) apresentam-se maiores na área convexa, confirmando maior presença de gibsita nesta área. O valor médio da relação Gb/(Gb+Ct) para a área cônica foi de 0,06, enquanto para a área convexa foi de 0,12, sendo a diferença entre as médias significativa pelo teste t. SOUZA (2004) e CUNHA

(2000), estudando Latossolos Vermelho distrófico e eutroférico, encontraram um valor médio para relação Gb/(Gb+Ct) de 0,45 e 0,30, respectivamente.

Através dos atributos cristalográficos apresentados (Tabela 1), percebe-se que a gibsita apresenta diferenças quantitativas, enquanto a caulinita apresenta diferenças qualitativas nas duas áreas estudadas. Portanto a área convexa apresenta as maiores quantidades de gibsita e os menores cristais de caulinita quando comparada com a área côncava. Isto demonstra que a área convexa apresentou um ambiente favorável à formação da gibsita, mostrando que o relevo pode servir de base para indicações de limites de ambientes, podendo indicar locais específicos para manejo e transferência de informação (SOUZA et al., 2006; MARQUES JÚNIOR & LEPSCH, 2000).

Os teores de fósforo disponível apresentaram-se diferenciados nas duas áreas estudadas (Tabela 2), sendo que os valores médios na profundidade de 0,0-0,20 m foram de 12 e 7 mg dm<sup>-3</sup>, enquanto na profundidade de 0,20-0,40 m os teores variaram de 11 e 6 mg dm<sup>-3</sup> para as áreas côncava e convexa, respectivamente. Deste modo, os menores valores médios de fósforo encontram-se na área convexa, na qual estão presentes as maiores relações Gb/(Gb+Ct), ou seja, os maiores teores de gibsita, concordando com os trabalhos de MOTTA et al. (2002); ROLIM NETTO et al. (2004); BAHIA FILHO (1982), DICK (1986), CURI et al. (1988), MESQUITA FILHO & TORRENT (1993), SCHAEFER et al. (2004), BORGGAARD et al. (1990).

Pela análise dos teores de argila nas duas áreas (Tabela 2), percebe-se que os maiores valores se encontram na área convexa, o que demonstra a influência do teor de argila na capacidade de fixar fósforo. ROLIM NETTO et al. (2004) encontraram que as correlações mais expressivas envolvendo a capacidade máxima de adsorção de fósforo estão ligadas à gibsita e à % argila. HEREDIA & CIRELLI (2007) encontram aumento na adsorção de fósforo com o aumento do teor de argila.

Quando se observa a CTC do solo (Tabela 2), percebe-se que os maiores valores se encontram na área convexa, ou seja, na área que apresenta as menores quantidades de fósforo disponível. Já a CTC da argila apresentou os maiores valores médios na área côncava, demonstrando a maior presença de cargas negativas nesta área, e confirmando a maior presença de cargas positivas na área convexa, devido à maior quantidade de gibsita presente nesta área. Deste modo, os maiores valores de

CTC do solo na área convexa se justificam pela maior presença da matéria orgânica nesta área.

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos do solo nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m.

Parâmetros	Área	Média	Mediana	Mín.	Máx.	p <sup>1</sup>	Coeficientes		
							Var. (%)	Assimetria	Curtose
<b>0,00-0,20 m</b>									
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg dm <sup>-3</sup> )	Côncava	12 a	11	4	25	0,07	41	0,64	-0,23
	Convexa	7 b	7	1	14	0,15	51	0,01	-0,54
MO (g dm <sup>-3</sup> )	Côncava	13 b	13	9	20	0,15	18	0,44	-0,06
	Convexa	15 a	14	10	20	0,15	14	0,16	0,11
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	Côncava	189 b	185	80	325	0,15	27	0,35	-0,27
	Convexa	230 a	229	138	325	0,15	16	0,36	0,33
CTC do solo (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Côncava	52 b	53	35	66	0,15	13	-0,16	-0,54
	Convexa	61 a	61	47	67	0,15	10	0,40	0,03
CTC Argila (mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Côncava	275a	286	203	437	0,03	39	0,28	0,08
	Convexa	265a	266	206	340	0,15	32	0,30	0,11
<b>0,20-0,40 m</b>									
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg dm <sup>-3</sup> )	Côncava	11 a	10	3	24	0,03	46	0,69	-0,1
	Convexa	6 b	6,0	1	15	0,15	54	0,20	-0,48
MO (g dm <sup>-3</sup> )	Côncava	12 b	12	6	19	0,15	22	0,19	-0,08
	Convexa	14 a	14	8	18	0,15	14	0,08	0,004
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	Côncava	215 b	200	101	369	0,01	30	0,47	-0,73
	Convexa	255 a	250	178	390	0,04	15	0,45	-0,65
CTC do solo (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Côncava	52 b	52	36	70	0,15	13	0,10	0,17
	Convexa	61a	61	49	77	0,15	10	0,29	-0,56
CTC Argila (mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Côncava	242a	260	189	356	0,07	41	0,05	1,02
	Convexa	239a	244	197	275	0,15	29	0,15	-0,32

<sup>1</sup>p = nível mínimo de significância do teste de Kolmogorov-Smirnov, p<0,05 significância a 5%, p<0,01 significância a 1%, p>0,05 não significativo, Mín=mínimo, Máx=máximo, Var=variação, As médias dos atributos do solo, acompanhadas da mesma letra, são estatisticamente iguais entre si, pelo teste t.

HEREDIA & CIRELLI (2007) e MESQUITA FILHO & TORRENT (1993) sugeriram em seus estudos que a matéria orgânica favorece a desorção de fósforo à solução do solo, competindo com o fósforo por locais de adsorção. Porém MESQUITA FILHO & TORRENT (1993) concluíram que, para os solos com baixos teores de matéria orgânica, a adsorção de fósforo deve ser predita através das características mineralógicas do solo. BORGGAARD et al. (1990), estudando a capacidade de adsorção de fósforo antes e depois da remoção da matéria orgânica, concluíram que

não houve nenhuma influência da matéria orgânica na adsorção máxima de fósforo no solo, o que sugere que a matéria orgânica não compete com o fósforo por locais de adsorção. No presente trabalho, os maiores teores de matéria orgânica encontram-se na área convexa (Tabela 2), ou seja, na quadra com menor disponibilidade de fósforo, demonstrando que a matéria orgânica não influenciou na disponibilidade de fósforo, concordando com o trabalho de BORGGGAARD et al. (1990) e MESQUITA FILHO & TORRENT (1993).

Os dados de capacidade máxima de adsorção de fósforo obtida através da equação de linearização de Langmuir estão apresentados na Tabela 3. Os valores encontrados variaram de 416 a 526  $\text{mg kg}^{-1}$  na área côncava e de 454 a 588  $\text{mg kg}^{-1}$  na área convexa. Realizando-se o cálculo da média, a área côncava apresentou capacidade máxima de adsorção de fósforo de 416  $\text{mg kg}^{-1}$ , enquanto a área convexa apresentou 539  $\text{mg kg}^{-1}$ . ROLIM NETTO et al. (2004), estudando vários solos com altos teores de ferro, encontraram valores variando de 550 a 1.900  $\text{mg kg}^{-1}$  na capacidade máxima de adsorção de fósforo.

Todos os pontos escolhidos apresentaram maiores valores de capacidade máxima de adsorção de fósforo na área convexa (Tabela 3), sendo que a média dos seis pontos apresentou diferença significativa pelo teste t. Isto confirma que a gibsite participa fortemente na adsorção de fósforo, sendo mais determinante que a matéria orgânica (BORGGGAARD et al., 1990; MESQUITA FILHO & TORRENT, 1993). MOTTA et al. (2002) encontraram em seu estudo uma variação na capacidade máxima de adsorção de fósforo de 676 para 1.233  $\text{mg kg}^{-1}$  quando a relação  $\text{Gb}/(\text{Gb}+\text{Ct})$  variou de 0,47 para 0,54, respectivamente.

BORGGGAARD et al. (1990) encontraram que mais de 96% da variação em adsorção máxima de fósforo poderia ser esclarecido pelos óxidos mal cristalizados do alumínio e do ferro e pelos óxidos bem cristalizados do ferro. No presente estudo, os valores de capacidade máxima de adsorção de fósforo (Tabela 3) e fósforo disponível (Tabela 2) sugerem que a gibsite é a grande responsável pela maior adsorção e menor disponibilidade de fósforo na área convexa, uma vez que este mineral se apresenta em maiores quantidades nesta área.

Tabela 3. Capacidade máxima de adsorção de fósforo obtida através da equação de linearização de Langmuir para as duas áreas estudadas.

PONTO	Capacidade máxima de adsorção de fósforo ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	
	Área Côncava	Área Convexa
1	435	555
2	526	588
3	500	588
4	435	526
5	454	526
6	416	454
Média	461a	539b

As médias dos atributos do solo, acompanhadas da mesma letra, são estatisticamente iguais entre si, pelo teste t.

De acordo com SOUZA (2004), a adoção de classes de coeficiente de variação como complemento aos estudos de avaliação da variabilidade espacial do solo é bastante comum. Apesar de este parâmetro permitir comparar a variabilidade entre amostras com unidades diferentes, o seu emprego não deve ser generalizado, devendo-se apreciar esses resultados segundo as finalidades a que se destina o trabalho. De acordo com a classificação proposta por WARRICK e NIELSEN (1980), valores de coeficientes de variação baixos foram encontrados para a relação  $G_b/(G_b+C_t)$  na área convexa (Tabela 1) e na área côncava, e para a CTC do solo na área convexa (Tabela 2), nas duas profundidades estudadas. CUNHA (2000), estudando superfície geomórfica, encontrou baixo coeficiente de variação para a relação  $G_b/(G_b+C_t)$ . O restante dos atributos apresentou coeficiente de variação médio e alto (Tabelas 1 e 2). SOUZA (2004), estudando mineralogia de Latossolos encontrou médio e alto coeficiente de variação para a maioria dos atributos avaliados.

Os valores da média e mediana, para todas as variáveis, estão próximos, mostrando distribuições simétricas, o que pode ser confirmado pelos valores de assimetria próximos de zero. Mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência ou não do chamado efeito proporcional, segundo ISAACS & SRIVASTAVA (1989), o qual não foi observado nos dados das variáveis estudadas, ou seja, ocorre a estacionaridade necessária ao uso da geoestatística. Para dados obtidos na natureza, o ajuste de uma distribuição teórica é apenas aproximado (WARRICK & NIELSEN, 1980; GOOVAERTS, 1997; WEBSTER, 2000). A normalidade dos dados não é uma exigência

da geoestatística, é conveniente apenas que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as análises (WEBSTER, 1985; CRESSIE, 1991).

Os resultados da análise geoestatística (Tabela 4 e Apêndices 1, 2, 3, 4, 8 e 9) mostraram que todas as variáveis analisadas apresentaram dependência espacial nas duas profundidades estudadas. Na profundidade de 0,0-0,2 m, apenas a CTC do solo na área convexa e a CTC da argila na área côncava apresentaram ajuste ao modelo exponencial. Na profundidade de 0,20-0,40 m a matéria orgânica nas duas áreas e a CTC do solo na área convexa ajustaram-se ao modelo gaussiano. Já os atributos CTC do solo, CTC da argila, área do pico da caulinita, DMC gibsita e a relação  $G_b/(G_b+C_t)$ , na área côncava, melhor se ajustaram ao modelo exponencial. O restante dos atributos apresentou ajuste ao modelo esférico. Vários trabalhos encontram ajuste ao modelo esférico para a maioria dos atributos do solo (SANCHEZ et al., 2005; GREGO & VIEIRA, 2005; SILVA & CHAVEZ, 2001). Segundo GREGO & VIEIRA (2005), o modelo matemático esférico é o que predomina nos trabalhos em ciência do solo. McBRATNEY & WEBSTER (1986) estudaram modelos de ajuste do semivariograma para os atributos do solo e relataram que os modelos esférico e exponencial são os mais encontrados.

O efeito pepita é um parâmetro importante do semivariograma e indica variabilidade não explicada, considerando a distância de amostragem utilizada (VIEIRA, 2000). Esse parâmetro pode ser expresso como percentagem do patamar, com o objetivo de facilitar a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo (TRANGMAR et al., 1985). Na análise do grau de dependência espacial das variáveis em estudo (Tabela 4), utilizou-se a classificação de CAMBARDELLA et al. (1994). Na profundidade de 0,00-0,20 m, os atributos fósforo e CTC do solo na área côncava apresentaram grau de dependência espacial moderada. Na profundidade de 0,20-0,40 m, apresentaram moderado grau de dependência espacial os atributos fósforo, MO, argila e CTC do solo, na área côncava, e CTC do solo e área do pico da caulinita na área convexa. O restante dos atributos apresentou forte grau de dependência espacial.

Tabela 4. Parâmetros geoestatísticos dos atributos do solo nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m.

Parâmetros	Área	Modelo	Alcance (m)	$^1C_0$	$^2C_0+C_1$	$^3C_0/(C_0+C_1)$ %	$r^2$
<b>0,00-0,20 m</b>							
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg dm <sup>-3</sup> )	Côncava	Esférico	101	11,57	23,49	49	0,9
	Convexa	Esférico	26	0,01	11,4	0,1	0,8
MO (g dm <sup>-3</sup> )	Côncava	Esférico	22	0,08	3,71	2	0,8
	Convexa	Esférico	22	0,16	3,89	4	0,9
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	Côncava	Esférico	95	567	2523	22	0,9
	Convexa	Esférico	23	27	1204	2	0,8
CTC do solo (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Côncava	Esférico	86	18,94	45,95	41	0,9
	Convexa	Exponencial	25	4,8	36,65	13	0,7
CTC Argila (mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Côncava	Exponencial	33	108	1474	7	0,9
	Convexa	Esférico	20	38	1052	4	0,7
<b>0,20-0,40 m</b>							
P (mg dm <sup>-3</sup> )	Côncava	Esférico	89	9,2	23,21	39	0,9
	Convexa	Esférico	23	0,4	10,01	4	0,8
MO (g dm <sup>-3</sup> )	Côncava	Gaussiano	28	1,68	3,37	49	0,8
	Convexa	Gaussiano	19	0,5	3,67	13	0,9
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	Côncava	Esférico	85	1972	3945	50	0,9
	Convexa	Esférico	28	41	1203	3	0,9
CTC do solo (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Côncava	Exponencial	80	15,9	61,11	26	0,9
	Convexa	Gaussiano	24	20,7	47,37	43	0,8
CTC Argila (mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Côncava	Exponencial	35	105	1082	10	0,8
	Convexa	Esférico	30	16	622	3	0,8
Área do pico (Ct) (cm <sup>2</sup> )	Côncava	Exponencial	36	0,021	0,1404	15	0,6
	Convexa	Esférico	18	0,0058	0,194	30	0,7
Área do pico (Gb) (cm <sup>2</sup> )	Côncava	Esférico	18	0,000014	0,00247	2	0,8
	Convexa	Esférico	17	0,00015	0,00672	0,2	0,7
LMA Ct (°2θ)	Côncava	Esférico	22	0,00001	0,0059	0,3	0,7
	Convexa	Esférico	18	0,000027	0,00944	8	0,8
LMA Gb (°2θ)	Côncava	Exponencial	28	0,00046	0,005570	3	0,9
	Convexa	Esférico	18	0,00005	0,00192	4	0,9
DMC Ct (nm)	Côncava	Esférico	19	0,01	26,24	0,03	0,7
	Convexa	Esférico	15	0,94	19,54	5	0,7
DMC Gb (nm)	Côncava	Exponencial	29	1120	9240	12	0,5
	Convexa	Esférico	16	1400	64990	2	0,5
Gb/Gb+Ct	Côncava	Exponencial	28	0,000181	0,0013	14	0,7
	Convexa	Esférico	18	0,00005	0,00179	3	0,9

<sup>1</sup>C<sub>0</sub> = efeito pepita; <sup>2</sup>C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> = patamar; <sup>3</sup>C<sub>0</sub>/(C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub>) = grau de dependência espacial.

O alcance é de fundamental importância para a interpretação dos semivariogramas (CARVALHO et al., 2002). Ele indica a distância até onde os pontos amostrais estão correlacionados entre si (VIEIRA et al., 1983; VIEIRA, 1997), ou seja, os pontos localizados em uma área cujo raio seja o alcance, são mais semelhantes entre si do que os separados por distâncias maiores. Os alcances encontrados variaram de 22 a 101 metros na profundidade de 0,00-0,20 m e de 18 a 89 metros, na profundidade de 0,20-0,40 m, para a área côncava. Na área convexa, os alcances variaram de 20 a 26 metros na profundidade de 0,00-0,20 m e de 15 a 30 m na profundidade de 0,20-0,40 m (Tabela 4). SOUZA et al. (2006) encontraram valores de alcance variando de 27 a 58 metros, na profundidade de 0,00-0,20 m, e de 29 a 52 m na profundidade de 0,60-0,80 m, estudando a variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolos.

Os atributos apresentaram diferentes alcances de dependência espacial, sendo que, na área côncava, foram obtidos os maiores alcances para todos os atributos. Os menores valores de alcance encontrados na área convexa mostram a maior variabilidade espacial dos atributos químicos existentes nesta área e demonstram a influência do relevo no comportamento espacial destes atributos (Tabela 2 e Figuras 2, 3 e 4). SOUZA (2004), LEÃO (2004), e SOUZA et al. (2006b) também encontraram influência do relevo na variabilidade espacial de atributos do solo.

## **CONCLUSÕES**

A formação dos minerais da fração argila é condicionada pelas variações do relevo, sendo que a área convexa apresenta ambiente mais favorável à formação da gibsitita do que a área côncava, demonstrando que o relevo pode ser utilizado para a definição de limites de áreas mais homogêneas.

A gibsitita é o fator determinante para a maior capacidade de adsorção máxima e menor disponibilidade de fósforo na área convexa.

A área convexa apresenta maior variabilidade espacial para todos os atributos estudados quando comparada com a área côncava.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAHIA FILHO, A. F. C. **Índices de disponibilidade de fósforo em Latossolo do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas.** 1982. 179 f.. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1982.

BLOOM, P. R. Phosphorus adsorption by an aluminium–peat complex. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 267–272, 1981.

BORGGGAARD, O. K.; JÖRGENSEN, S. S.; MOBERG, J. P.; RABEN-LANGE, B. Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminium and iron oxides in sandy soils. **European Journal of Soil Science**, v. 41, n. 3, p. 443–449, 1990.

BÖRLING, K.; OTABBONG, E.; BARBERIS, E.; Phosphorus sorption in relation to soil properties in some cultivated Swedish soils. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** v. 59, p.39–46, 2001.

BOUMA, J.; STORVOGEL, J.; ALPHEN, B. J. van; BOOLTINK, H. W. G. Pedology, precision agriculture, and the changing paradigm of agricultural research. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, n.6, p.1763-1768, 1999.

BUSATO, J. G.; CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X. Fósforo num Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. I: Fracionamento seqüencial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.6, p. 935-945, 2005.

CAMBARDELLA, C. A.; MOOMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEM, D. L.; TURVO, R. F. & KONOPA, A. E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106).

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

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1991. 900 p.

CUNHA, P. **Superfícies geomórficas e variabilidade de Latossolos em uma vertente sobre arenito-basalto em Jaboticabal (SP)**, 2000. 149 f. Tese (Doutorado em Agronomia) -Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2000.

CURI, N.; CAMARGO, O. A.; GUEDES, G. A. A. & SILVEIRA, J. V. Sorção de fósforo em materiais de Latossolos do Brasil sudeste. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., 1988, Rio de Janeiro. **Anais....** Rio de Janeiro: Embrapa, 1988. p.267-282.

DICK, D. P. **Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes B latossólicos**. 1986. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, 1999. 412p.

FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. **Geoderma**, Amsterdam, v.72, p. 37-51, 1996.

GHIDIN, A. A. ; MELO, V. F. ; LIMA, V. C. ; LIMA, J. M. J. C. Topossequência de latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I – Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n. 2, p.293-306, 2006.

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

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

HEREDIA, O. S.; CIRELLI, A. F. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity. **Geoderma**, Amsterdam, v.137, p.426–431, 2007.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. Escala - 1:1.000.000**. São Paulo. IPT, 1981. v.1, 94p.

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

JOHNSON, S. E.; LOEPPERT R. H. Role of organic acids in phosphate mobilization from iron oxide. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.70, p.222-234, 2006.

KÄMPF, N. & CURI, N. Óxidos de Ferro: Indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, SBCS, v.1 p.107-138, 2001.

KOPPI, A. J.; SKJEMSTAD, J. O. Soil kaolins and their genetic relationships in southeast Queensland. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 32, n. 3, p. 661-672, 1981.

LEÃO, M. G. A. **Relação entre atributos de uma vertente com Latossolos e qualidade de fruta cítrica**. 2004. 119 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.

LOMBI, E.; SCHECKEL, K. G.; ARMSTRONG, R. D.; FORRESTER, S.; CUTLER, J. N.; PATERSON, D. Speciation and distribution of phosphorus in a fertilized soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.70, p.2038-2048, 2006.

MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I. F. Depósitos superficiais neocenozóicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. **Geociência**, São Paulo, v.19, n. 2, p.26-231, 2000.

MC BRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal Soil Science**, Oxford, v.37, n.4, p.617-639, 1986.

MELO, V. F.; FONTES, M. P. F.; NOVAIS, R. F.; SINGH, B.; SCHAEFER, C. E. G. R. Características dos óxidos de ferro e de alumínio de diferentes classes de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 19-32, 2001.

MESQUITA FILHO, M. V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from Cerrado Region (Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v.58, p.107-123, 1993.

MOTTA, P. E. F.; CURI, N.; SIQUEIRA, J. O.; VAN RAIJ, B.; FURTINI NETO, A. E.; LIMA, J. M. Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: influencia da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 349-359, 2002.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

RAIJ, van B. ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed.) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p.151-160, 2001.

ROBERTSON, G.P. **GS+**: Geostatistics for the environmental sciences (version 5.1 for windows). Gamma Design Software, 1998. 152 p.

ROLIM NETO, F. C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; COSTA, L. M.; CORRÊA, M. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; IBRAIMO, M. M. Adsorção de fósforo, superfície específica atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 953-964, 2004.

SADLER, E.J.; BUSSCHER, P.J.; BAUER, P.J.; KARLEN, D.L. Spatial scale requirements for precision farming: a case study in the southeastern USA. **Agronomy Journal**, Madison, v.90, n.2, p.191-197, 1998.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.489-495, 2005

SANCHEZ, R. S. **Zonas de manejo caracterizadas por meio de pedoformas em áreas sob o cultivo de cana-de-açúcar**. 2003. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

SCHAEFER, C.E.G.R.; GILKES, R.J.; FERNANDES, R.B.A. EDS/SEM study on microaggregates of Brazilian Latosols, in relation to P adsorption and clay fraction attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, p.1-33, 2004.

SCHLOTZHAVER, S.D.; LITTELL, R.C. **SAS**: system for elementary statistical analysis. 2. ed. Cory: SAS, 1997. 905 p.

SILVA, P. C. M.; CHAVES, L. H. G. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em alissolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.3, p. 431-436, 2001.

SOUZA, Z.M. **Variabilidade espacial e atributos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo**. 2004. 141 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M.; Effects of relief shapes on soil chemical properties of a oxisol cultivated with sugar cane. **Scientia Agrícola**, Piracicaba: v.63, n. 2, p.161 - 168, 2006 b.

TIESSEN, H.; MOIR, J. O. Characterization of available P by sequential extraction. In: CARTER, M.R. (ed.) **Soil sampling and methods of analysis**. Boca Raton: Lewis, 1993. p.75-86.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v.38, n.1, p.45-93, 1985.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **American Journal of Science**, New Haven, v. 263, n. 3, p. 616-627, 1965.

ULÉN, B.; SNÄLL, S. Forms and retention of phosphorus in an illite-clay soil profile with a history of fertilisation with pig manure and mineral fertilizers. **Geoderma**, Amsterdam, v.137, p. 455–465, 2007.

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

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-53.

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

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. cap. 2, p. 319-344.

WEBSTER, R. Is soil variation random? **Geoderma**, Amsterdam, v.97, n.1-2, p.149-163, 2000.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. **Advances and Soil Science**, New York, v.3, n.1, p.1-70, 1985.

### **CAPÍTULO 3 – VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM ARGISSOLO PARA APLICAÇÃO DE INSUMOS À TAXA VARIÁVEL EM DIFERENTES FORMAS DO RELEVO**

#### **RESUMO**

A agricultura de precisão implica a análise da variabilidade espacial dos fatores de produção e a aplicação dos insumos de forma localizada e em doses precisas. Várias são as causas que condicionam a variabilidade espacial dos atributos dos solos, sendo o relevo um dos fatores determinantes. O presente trabalho teve por objetivo analisar a influência do relevo na variabilidade espacial dos atributos químicos e a aplicação de insumos em taxa variável. Duas parcelas de um hectare foram delimitadas em área côncava e convexa. Foram retiradas 121 amostras em cada área. Os dados dos atributos químicos foram submetidos às análises da estatística descritiva, geoestatística e interpolação por krigagem. A adoção da agricultura de precisão possibilitou economia de aproximadamente 25 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na área côncava. O uso da técnica de geoestatística possibilitou a precisa descrição das propriedades do solo, sendo que o relevo demonstrou ser uma poderosa ferramenta para a definição de zonas de manejo.

**Palavras chaves:** Agricultura de precisão, cana-de-açúcar; manejo químico do solo

## INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão tem por objetivo aumentar a eficiência do manejo de técnicas agrícolas, sendo uma tecnologia em desenvolvimento, que modifica técnicas existentes e incorpora novas tecnologias para o administrador utilizar (BISCARO & GARZELLA, 2006). Conforme ANTUNIASSI (1998) e BORGELT et al. (2004), o mapeamento detalhado dos fatores de produção e a aplicação localizada de insumos são os princípios básicos do sistema. Desta forma, a caracterização da variabilidade dos recursos é de fundamental importância para o uso efetivo da tecnologia de agricultura de precisão, tornando-se imprescindível para que esta técnica seja confiável (GREGO & VIEIRA 2005; SILVEIRA et al., 2000).

Quando determinado atributo do solo varia de um local para outro, com algum grau de organização ou continuidade, expresso pela avaliação da dependência espacial, os resultados da estatística clássica são mais bem entendidos e aproveitados pela geoestatística. Ajustado o semivariograma dos atributos, podem-se interpolar valores em qualquer posição no campo de estudo, sem tendência e com variância mínima. A este método dá-se o nome de krigagem (VIEIRA, 2000).

Em uma paisagem natural, o solo apresenta variabilidade espacial e temporal de seus atributos, resultante da interação de processos que comandam os fatores responsáveis por sua formação (MONTEZANO et al., 2006). A associação da variabilidade espacial dos atributos dos solos às formas da paisagem tem sido estudada por vários autores (MONTANARI et al., 2005; SOUZA et al., 2006b; SOUZA et al., 2006a) e tem contribuído para a identificação e o mapeamento de áreas mais homogêneas, com limites mais precisos entre elas (MARQUES JÚNIOR & LEPSCH, 2000; SOUZA et al., 2006b), permitindo que técnicas agronômicas possam ser transferidas com facilidade e economia para ambientes semelhantes.

A forma do relevo pode auxiliar na definição de esquemas amostrais, bem como no mapeamento de zonas de manejo físico e químico do solo (CARVALHO et al., 2003; SOUZA et al., 2006b). De acordo com MONTANARI et al. (2005), as pedoformas em áreas de mesma classe de solo e mesmo histórico de manejo de cana-de-açúcar, durante vários anos, influenciam na variabilidade dos atributos químicos dos solos de

maneira sistemática. Estudos mostram que há maior variabilidade de atributos químicos e físicos em áreas de formas côncavas e convexas, em relação às formas lineares, independentemente do histórico de manejo dessas áreas (SOUZA et al., 2006a; SOUZA et al., 2004).

A variabilidade espacial dos atributos químicos do solo possibilita a recomendação de doses de calcário, fósforo e potássio com taxas variadas, proporcionando economia e maior eficiência na aplicação, onde os limites de áreas mais homogêneas podem ser precisamente definidos pelas características do relevo. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial dos atributos químicos de um Argissolo para fins de mapeamento da necessidade de aplicação de insumos em taxas variadas, em áreas com diferentes formas de relevo sob o cultivo de cana-de-açúcar.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

A área de estudo está localizada na região de Catanduva – SP, inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista. O clima da região foi classificado pelo método de Köppen como tropical quente úmido, tipo Aw, seco no inverno, com precipitação média de 1.350 mm, temperatura média anual de 23°C, com temperatura no mês mais quente superior a 22 °C e a do mês mais frio inferior a 18 °C, e umidade relativa do ar de 74%. A vegetação primária da região de Catanduva foi classificada como floresta pluvial estacional de cerrado, sendo utilizada há mais de 20 anos com o cultivo de cana-de-açúcar (SANCHEZ, 2003). O material de origem dos solos foi mapeado como rocha arenítica do Grupo Bauru, Formação Adamantina (IPT, 1981). O solo da área de estudo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico textura média/argilosa (EMBRAPA, 1999). Nesta mesma área, por meio de tradagem, SANCHEZ (2003) realizou a determinação do horizonte A+E em 188 pontos, sendo que a espessura média encontrada foi de 0,40 m na área côncava e de 0,32 m na área convexa.

Para o mapeamento da área, foi utilizado equipamento de posicionamento global (GPS), que registrou as coordenadas geográficas: Latitude 21°05'S e Longitude 49°01'W. Elaborou-se o modelo de elevação digital que, juntamente com as atividades

de campo, possibilitou a identificação e a separação das formas do terreno e sua posterior classificação geomorfológica conforme TROEH (1965). De acordo com esta classificação, em uma área de 200 ha, foram mapeadas duas curvaturas, sendo uma côncava e a outra convexa (Figura 1).

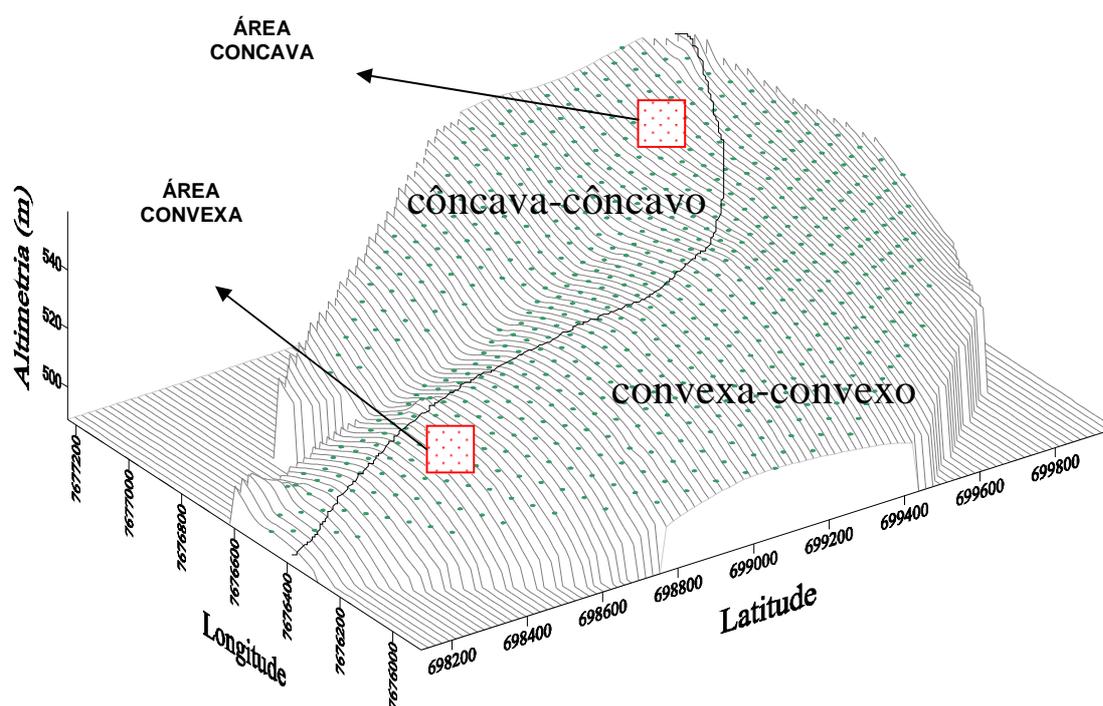


FIGURA 1. Modelo de elevação digital do terreno e localização das áreas côncava e convexa. (Figura extraída de SANCHEZ, 2003).

Nessa área, duas parcelas de um hectare foram delimitadas, sendo que uma parcela localizada na forma côncava e a outra na convexa. Uma malha de espaçamento de 10 x 10 m foi confeccionada em cada uma das parcelas, e os pontos localizados nos cruzamentos das malhas foram georreferenciados. Os solos foram amostrados nos pontos de cruzamento da malha, nas profundidades de 0,0-0,2 m; 0,2-0,4 m, perfazendo um total de 121 pontos em cada malha. As amostras foram levadas ao laboratório e submetidas à análise química. O cálcio, o magnésio, o potássio trocáveis e

o fósforo disponível foram extraídos utilizando-se do método da resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001).

O histórico de manejo das duas áreas é idêntico, e a variedade de cana-de-açúcar plantada em 2003 foi a SP801842.. A adubação líquida de plantio foi realizada com 700 litros  $\text{ha}^{-1}$  da fórmula 04-12-10 (N-P-K), sendo na adubação de cana soca utilizados 600 litros  $\text{ha}^{-1}$  da fórmula 10-00-10 (N-P-K). Torta de filtro e vinhaça não são aplicados nas áreas, sendo que atualmente a cana-de-açúcar se apresenta no terceiro corte

A necessidade de calagem e de adubação com fósforo e potássio foi estimada de duas maneiras: utilizando-se da média dos 121 pontos e considerando a variabilidade espacial dos atributos nas malhas. Para o cálculo da necessidade de calcário, utilizou-se a fórmula proposta por RAIJ et al. (1997), que leva em consideração o nível de acidez atual do solo, a CTC e o nível de saturação por bases ideal da cultura, que, no caso da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, é de 60%, considerando o PRNT de 100 %. Para o cálculo da adubação de fósforo e potássio, foram utilizadas as tabelas de adubação propostas por RAIJ et al. (1997), e a produtividade esperada considerada foi de 100 a 150  $\text{t ha}^{-1}$ .

Os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística descritiva com o uso do pacote estatístico SAS (SCHLOTZHAVER & LITTELL, 1997). Posteriormente, foram realizadas análises geoestatísticas através da construção de semivariogramas com o auxílio do programa GS<sup>+</sup> (ROBERTSON, 1998) e confecção dos mapas de krigagem através do programa SURFER (1999).

## RESULTADO E DISCUSSÃO

Os teores de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e a saturação por bases, bem como as necessidades médias de aplicação de nutrientes e calagem são apresentados na Tabela 1. Registra-se no solo da área convexa necessidade de maiores quantidades de fósforo e calcário, quando comparada com a área côncava. Porém, analisando a necessidade média de aplicação de potássio, nota-se que as duas áreas devem receber a mesma quantidade desse nutriente (Tabela 1). Os valores de máximo e mínimo, para os atributos fósforo,

potássio e V%, nas duas profundidades estudadas, apresentaram variação dentro das classes de fertilidade do solo propostas por RAIJ et al. (1997) para cana-de-açúcar

**Tabela 1.** Estatística descritiva para os atributos químicos na profundidade de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m.

Parâmetros	Área	Média	Mediana	Mín.	Máx.	p <sup>1</sup>	Coeficientes		
							Var. (%)	Assimetria	Curtose
<b>0,00-0,20 m</b>									
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg dm <sup>-3</sup> )	Côncava	12a	11	4	25	0,07	41	0,64	-0,23
	Convexa	7b	7	1	14	0,15	51	0,01	-0,54
K <sub>2</sub> O (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Côncava	1,3a	1,3	0,7	2,4	0,04	29	0,64	-0,23
	Convexa	1,4a	1,4	0,8	2,5	0,02	28	0,75	-0,10
V %	Côncava	71a	71	49	88	0,15	11	-0,33	-0,08
	Convexa	50b	51	19	73	0,15	25	-0,23	-0,53
Necessidade de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )	Côncava	121a	120	80	180	0,15	24	0,68	0,31
	Convexa	150b	120	120	180	0,01	20	0,28	-1,95
Necessidade de K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> )	Côncava	110a	120	80	150	0,01	16	-0,96	-0,74
	Convexa	110a	120	80	120	0,01	18	-0,57	-1,69
Necessidade de Calcário (t ha <sup>-1</sup> )	Côncava	-	-	-	-	-	-	-	-
	Convexa	1,0	0,6	0	2,5	0,15	56	0,7	-0,38
<b>0,20-0,40 m</b>									
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg dm <sup>-3</sup> )	Côncava	11a	10	3	24	0,03	46	0,69	-0,1
	Convexa	5,9b	6,0	1	15	0,15	54	0,20	-0,48
K <sub>2</sub> O (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Côncava	1,1a	1,1	0,7	1,8	0,07	24	0,60	-0,41
	Convexa	1,2a	1,2	0,8	2,0	0,01	25	0,94	-0,48
V %	Côncava	67a	69	38	91	0,15	14	-0,28	0,06
	Convexa	42b	43	18	68	0,15	28	0,20	-0,48

<sup>1</sup>p = nível mínimo de significância do teste de Kolmogorov-Smirnov, p<0,05 significância a 5%, p<0,01 significância a 1%, p>0,05 não significativo. Mín=mínimo, Máx=máximo, Var=variação, - sem necessidade de calcário. As médias dos atributos do solo, acompanhadas da mesma letra, são estatisticamente iguais entre si, pelo teste t.

Comparando-se os coeficientes de variação obtidos entre as duas áreas estudadas, observa-se que os valores encontrados na área convexa são maiores do que os da área côncava, com exceção do potássio e da necessidade de fósforo na profundidade de 0,00-0,20 m, refletindo maior variação dos dados na área convexa (Tabela 1) o que pode ser confirmado pelos diferentes comportamentos espaciais desses atributos (Tabela 2).

Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov indicaram normalidade para a maioria dos atributos. O teor e a necessidade de potássio na profundidade de

0,00-0,20 m, nas duas áreas estudadas, e a necessidade de fósforo na área convexa não apresentaram distribuição normal dos dados. Na profundidade de 0,20-0,40 m, apenas o fósforo na área côncava e o potássio na área convexa não apresentaram normalidade na distribuição dos dados. MONTEZANO et al. (2006) e MONTANARI et al. (2005), estudando variabilidade de atributos químicos, não encontraram distribuição normal para a maioria dos atributos estudados.

No presente estudo, foram encontrados valores de assimetria próximos a zero para todos os atributos estudados (Tabela 1). Resultados semelhantes foram encontrados por MONTANARI et al. (2005) e SOUZA et al. (2006a). Isto demonstra que todos os atributos envolvidos no estudo estão aproximando-se de uma distribuição normal, indicando que os dados estão adequados para o uso da geoestatística. Outra indicação de normalidade é que os valores de média e mediana, para todas as variáveis, estão próximos, mostrando distribuições simétricas (Tabela 1).

Todos os atributos avaliados apresentaram dependência espacial, que é expressa através dos ajustes aos modelos de semivariogramas (Tabela 2 e Apêndices 5, 6 e 7). Os dados da maioria dos atributos estudados ajustaram-se ao modelo matemático esférico; este, segundo GREGO & VIEIRA (2005), é o modelo que predomina para os atributos estudados em ciência do solo. Conforme classificação de CAMBARDELLA et al. (1994), o atributo fósforo, nas duas profundidades; a necessidade de fósforo, na profundidade 0,00-0,20 m, e o teor de potássio, na profundidade de 0,20-0,40 m, apresentaram grau de dependência espacial médio para a área côncava. Já a saturação por bases apresentou médio grau de dependência espacial nas duas áreas analisadas, na profundidade de 0,20-0,40 m. O restante dos atributos apresentou forte grau de dependência espacial.

O comportamento espacial diferenciado entre os atributos também pode ser observado pelo alcance (Tabela 2) que registrou seus maiores valores para a área côncava. Os menores valores de alcance, encontrados na área convexa, confirmam a maior variabilidade espacial dos atributos químicos existentes nesta área, reflexo da influência do relevo no comportamento espacial destes atributos (Tabela 2). Os resultados do comportamento espacial dos atributos, na profundidade de 0,20-0,40 m (Tabela 2), concordam com os da camada superficial, confirmando o caráter

pedogeomórfico como causa da variabilidade dos atributos do solo (MONTEZANO et al., 2006; CARVALHO et al., 2003).

Tabela 2. Coeficientes e modelos dos semivariogramas ajustados para os atributos químicos nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m.

Parâmetros	Área	Modelo	Alcance (m)	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	Co/(Co+C <sub>1</sub> ) %	r <sup>2</sup>
<b>0,00-0,20 m</b>							
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg dm <sup>-3</sup> )	Côncava	Esférico	101	11,57	23,49	49	0,9
	Convexa	Esférico	26	0,01	11,4	0,1	0,8
K <sub>2</sub> O (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Côncava	Exponencial	37	0,013	0,130	10	0,9
	Convexa	Esférico	23	0,002	0,12	2	0,8
V %	Côncava	Esférico	35	0,8	45,18	2	0,9
	Convexa	Exponencial	25	24,3	128	19	0,8
Necessidade de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ha)	Côncava	Gaussiano	42	414	828	50	0,9
	Convexa	Esférico	25	1	901	0,1	0,9
Necessidade de K <sub>2</sub> O (kg/ha)	Côncava	Esférico	21	3,1	313	1	0,5
	Convexa	Esférico	18	11	380	3	0,9
Necessidade de Calcário (t/ha)	Côncava	-	-	-	-	-	-
	Convexa	Esférico	22	0,001	0,58	0,2	0,7
<b>0,20-0,40 m</b>							
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg dm <sup>-3</sup> )	Côncava	Esférico	89	9,2	23,21	39	0,9
	Convexa	Esférico	23	0,4	10,01	4	0,8
K <sub>2</sub> O (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Côncava	Esférico	84	0,033	0,082	40	0,9
	Convexa	Esférico	22	0,006	0,153	4	0,8
V %	Côncava	Exponencial	132	45,8	103,9	44	0,9
	Convexa	Gaussiano	100	89,9	179,9	49	0,9

; a=alcance; C<sub>0</sub>=efeito pepita; C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub>=patamar; Co/(Co+C<sub>1</sub>) %= Grau de dependência espacial

Nos mapas gerados (Figuras 2, 3 e 4), pode ser vista a menor distância entre as isolinhas, demonstrando a maior variabilidade dos atributos na área convexa. Já nos mapas da área côncava, as distâncias entre as isolinhas são maiores, demonstrando existir menor variabilidade espacial dos atributos químicos analisados. De acordo com MARQUES JÚNIOR & LEPSCH (2000) e BARBIERI et al. (2006), para o entendimento das causas da variabilidade do solo, é preciso conhecer os processos do solo que operam em locais específicos. Esses processos estão muito ligados ao fluxo de água que, por sua vez, é controlado pelo relevo. Neste sentido, a compartimentação das formas do relevo revela ser eficiente para identificação e mapeamento de áreas com variabilidade controlada, bem como a transferência de informações.

As doses recomendadas para a aplicação do fósforo (Figura 4) na área côncava variam de 80 a 160 kg ha<sup>-1</sup> quando levados em conta os valores de cada ponto amostrado da área. Considerando a área homogênea, como feito na agricultura tradicional, a dose aplicada seria de 120 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 1). Desta forma, pela adubação baseada na média, boa parte da área deverá receber uma quantidade de adubo fosfatado superior ou inferior à dose realmente necessária (WANG et al., 2006; BISCARO & GARZELLA, 2006).

Já para o fósforo na área convexa, as doses a serem aplicadas variam de 105 a 185 kg ha<sup>-1</sup>, (Figura 4), e a aplicação média é de 150 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 1). O mapa da necessidade de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) mostra que metade da área convexa necessita de apenas 100 kg ha<sup>-1</sup> de adubo fosfatado. Considerando o tamanho da área de 1 hectare e aplicação média de 150 kg ha<sup>-1</sup>, a adoção das técnicas de agricultura de precisão gerariam uma economia de 25 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, uma vez que metade da área receberia apenas 100 kg ha<sup>-1</sup> do fertilizante. Desta forma, a utilização da técnica levaria a uma maior eficiência e economia do fertilizante, proporcionando, assim, além de menores custos na adubação, menor impacto ambiental por evitar um excesso de fósforo na área (BISCARO & GARZELLA, 2006).

Para os mapas de necessidade de potássio, os valores variam de 70 a 120 kg ha<sup>-1</sup> para ambas as áreas estudadas (Figura 4). O valor médio da necessidade de aplicação de potássio nas duas áreas é de 110 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 1). Entretanto, observa-se que há vários locais que necessitam de apenas 70; 80 ou 90 kg ha<sup>-1</sup>, e outros, de 120 kg ha<sup>-1</sup>. Deste modo também para adubação potássica realizada pela média dos pontos, os locais receberiam menor dose que a necessária; enquanto, em outros locais, a quantidade de adubo aplicado seria maior que a dose ótima. A necessidade de calagem informada pelos mapas obtidos por interpolação (Figura 4) variou de 0,0 a 2,4 t ha<sup>-1</sup> na área convexa, sendo que, na área côncava, não seria recomendado realizar a calagem.

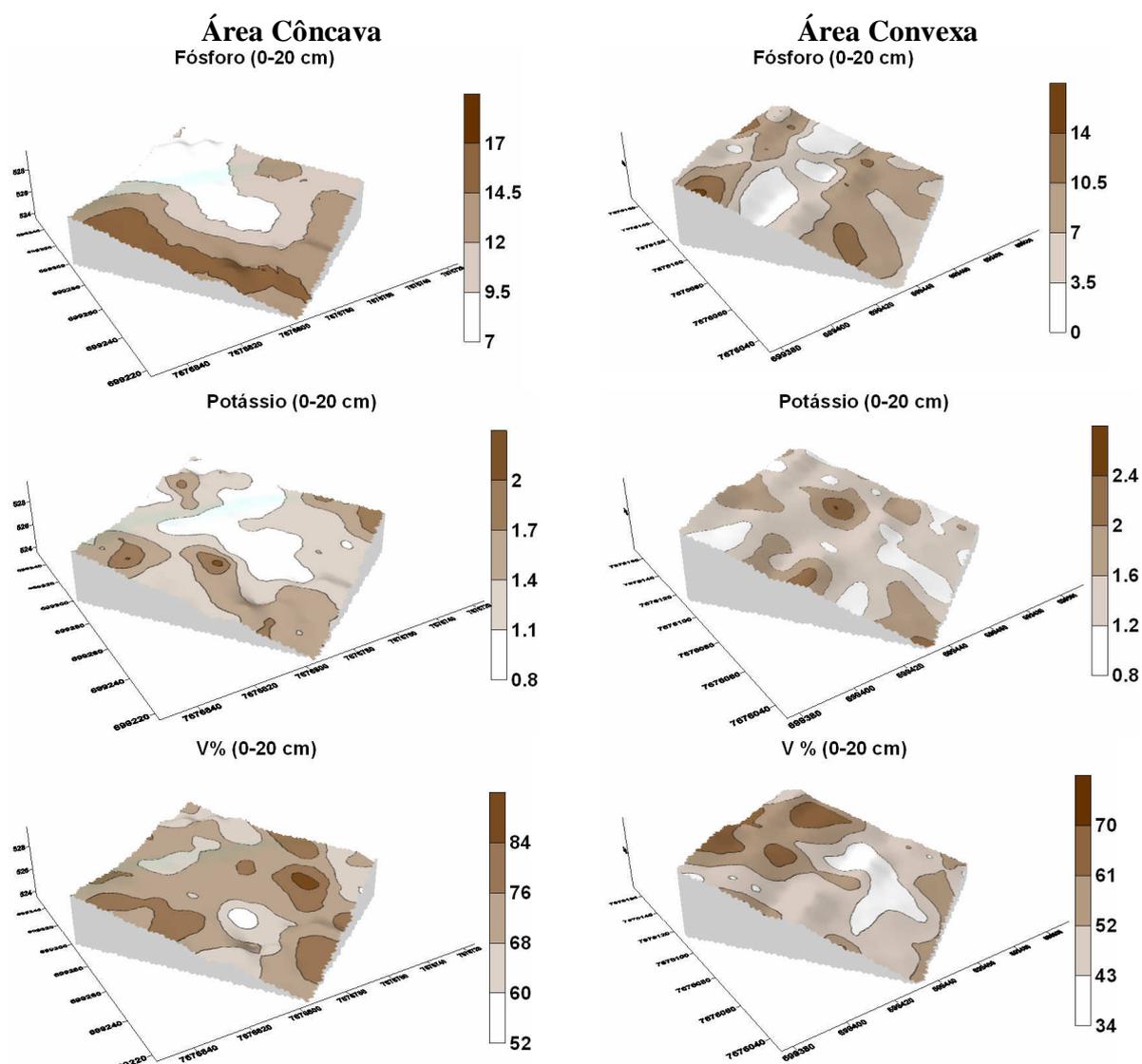


Figura 2. Mapas de krigagem dos atributos fósforo ( $P_2O_5$ ) ( $mg\ dm^{-3}$ ), potássio ( $K_2O$ ) ( $mmol_c\ dm^{-3}$ ) e saturação por bases (V) (%) na profundidade de 0-20 cm.

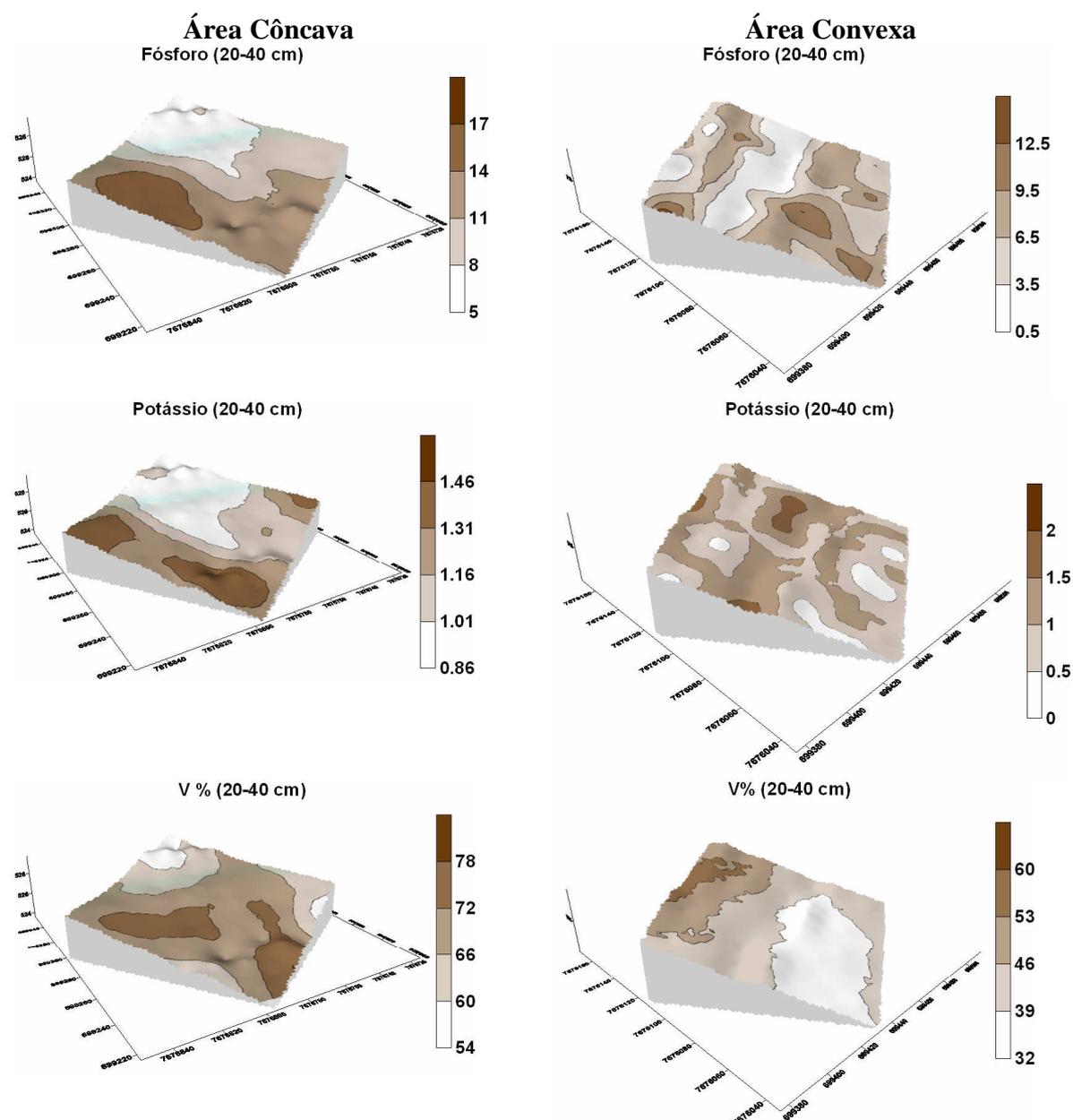


Figura 3. Mapas de krigagem dos atributos fósforo ( $P_2O_5$ ) ( $mg\ dm^{-3}$ ), potássio ( $K_2O$ ) ( $mmol_c\ dm^{-3}$ ) e saturação por bases (V) (%) na profundidade de 20-40 cm.

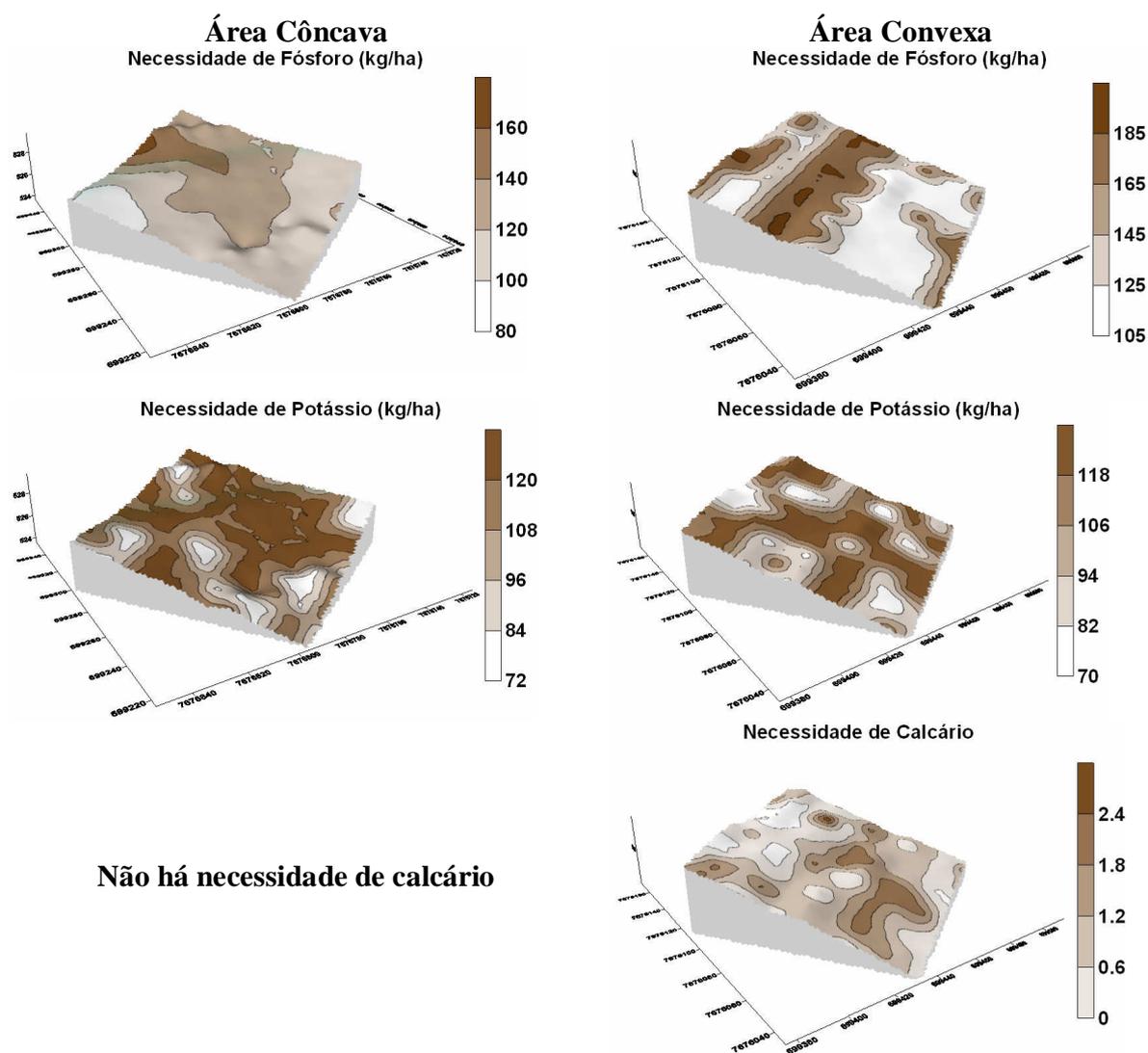


Figura 4. Mapas de krigagem para a necessidade de fósforo ( $P_2O_5$ ) ( $kg\ ha^{-1}$ ), potássio ( $K_2O$ ) ( $kg\ ha^{-1}$ ) e calcário ( $t\ ha^{-1}$ ).

Para a área convexa, o cálculo da necessidade de calcário, utilizando-se do método convencional sem considerar a variabilidade espacial de atributos da acidez do solo, indicou ser necessário aplicar  $1,0\ t\ ha^{-1}$  de calcário (Tabela 1). Assim, boa parte da área receberia calcário de forma desnecessária, onerando os custos de aplicação e causando inadequação ao equilíbrio na absorção de íons pelas plantas. CERRI (2001), testando equipamentos para aplicação à taxa variável, encontrou valores de necessidade de calagem variando de 2 a  $5\ t\ ha^{-1}$

## CONCLUSÕES

No presente estudo, o solo da área convexa apresentou maior variabilidade espacial dos atributos químicos quando comparado com o solo da área côncava.

Os limites das formas do relevo são fortes indicadores das zonas específicas para uma possível aplicação de insumos a taxas variadas.

Mapas para aplicação de insumos à taxa variada, elaborados por técnicas geoestatísticas, indicam maior eficiência para a aplicação de calcário, fósforo e potássio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNIASSI, U.R. Agricultura de precisão: aplicação localizada de agrotóxicos. In: GUEDES, J.V.C.; DORNELES, S.H.B. (Org.) **Tecnologia e segurança na aplicação dos agrotóxicos - novas tecnologias**. Santa Maria: Departamento de Defesa Fitossanitária; Sociedade de Agronomia de Santa Maria, 1998. p.53-63.

BARBIERI, D. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SANCHEZ, R. B.; GUIARDI, M. Influência da paisagem na variabilidade espacial dos fósforo e do potássio sob o cultivo de cana-de-açúcar. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 2006, São Pedro-SP. **Anais....** Piracicaba: Esalq, 2006. 1 Cd-rom.

BISCARO, A.S.; GARZELLA, T.C. Agricultura de precisão: uma valiosa ferramenta para redução de contaminação ambiental decorrente do uso de fertilizantes minerais nitrogenados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2006, São Pedro-SP.. **Anais.....** Piracicaba: Esalq, 2006. 1 CD-Room.

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

CAMBARDELLA, C.A. MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CARVALHO, M.P.; TAKEDA, E. Y. ; FREDDI, O. S. et al. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n.4, p. 695-703, 2003.

CERRI, D.G.P. **Desenvolvimento de um sistema de aplicação localizada de calcário a taxas variáveis**. 2001. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luís de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, 1999. 412 p.

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

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. Escala - 1:1.000.000**. São Paulo. IPT, 1981a, v.1, 94p.

MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I. F. Depósitos superficiais neocenozóicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. **Geociência**, São Paulo (SP), v.19, p.90-106, 2000.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.1, p.69- 77, 2005.

MONTEZANO, Z.F. CORAZZA, E. J.; MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homoganeamente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa , v. 30, n. 5, p. 839-847, 2006.

RAIJ, van B. ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Eds.) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.

RAIJ, van B; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

ROBERTSON, G.P. **GS<sup>+</sup>: Geostatistics for the environmental sciences – GS<sup>+</sup> User's Guide**. Plainwell, Gamma Design Software, 1998. 152p.

SANCHEZ, R. S. **Zonas de manejo caracterizadas por meio de pedofomas em áreas sob o cultivo de cana-de-açúcar**. 2003. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

SCHLOTZHAVER, S.D.; LITTELL, R.C. **SAS: system for elementary statistical analysis**. 2. ed. Cary: SAS, 1997. 905 p.

SILVEIRA, P.M. ZIMMERMANN, F. J. P.; SILVA, S. C.; CUNHA, A. A. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.10, p. 2057-2064, 2000.

SOUZA, Z. M; MARQUES JUNIOR, J., PEREIRA, G. T., MOREIRA, L. F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg, e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.6, p.1763-1771, nov-dez, 2004.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, José, PEREIRA, G. T., BARBIERI, D. M. Effects of relief shapes on soil chemical properties of a oxisol cultivated with sugar cane. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.63, n. 2 p.161 - 168, 2006a.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA G. T.; MONTANARI R. Otimização amostral de atributos de latossolos considerando aspectos solo-relevo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n3, p. 829-836, mai-jun, 2006b.

SURFER for windows. Realese 7.0. Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers. **User's guide**. New York:Golden software, 1999. 619p.

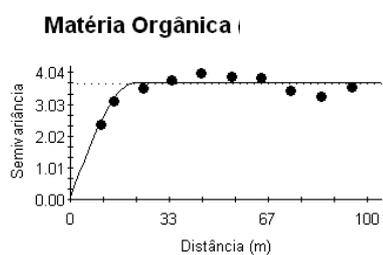
TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **American Journal of Science**, New Haven, v.263, n.3, p.616-627, 1965.

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

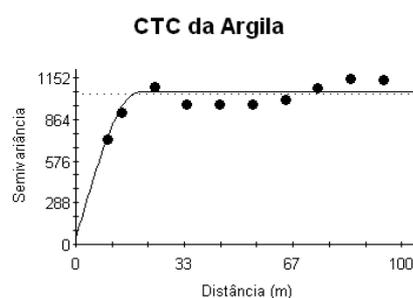
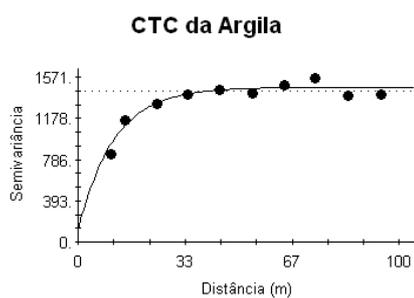
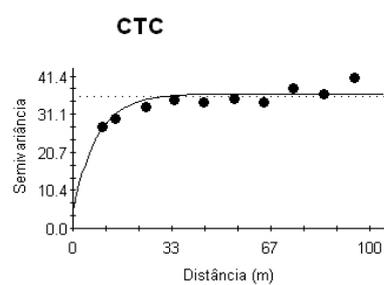
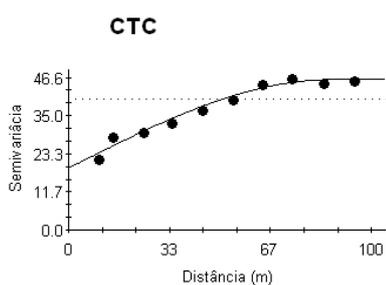
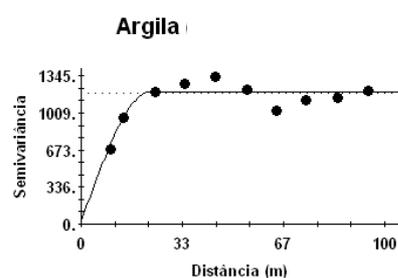
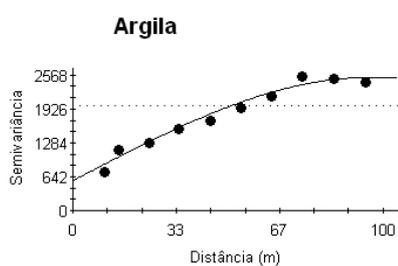
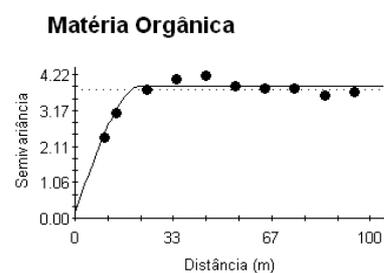
WANG B. H.; JIN, J.; WANG, B. Improvement of soil nutrient management via information technology. **Better Crops**, v. 90, n 3, p.30-32 2006.

## APÊNDICE

### Área Côncava



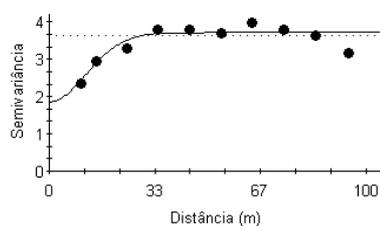
### Área Convexa



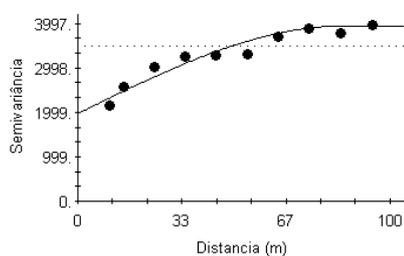
Apêndice 1. Modelos ajustados aos semivariogramas experimentais dos atributos: matéria orgânica ( $\text{g dm}^{-3}$ ), argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ), CTC do solo ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) e CTC da argila ( $\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) na profundidade de 0,00-0,20 m.

### Área Côncava

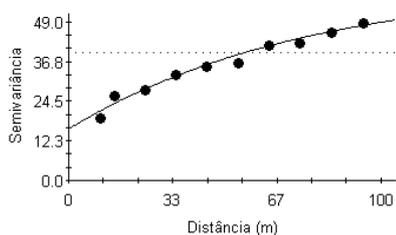
#### Matéria Orgânica



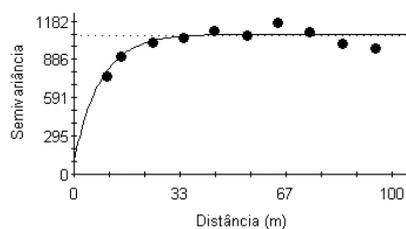
#### Argila



#### CTC

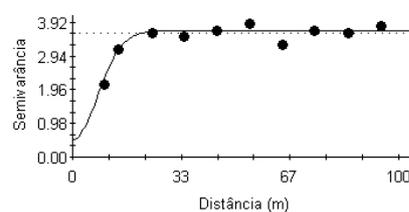


#### CTC da Argila

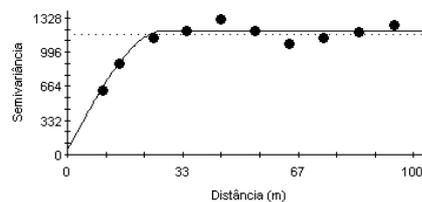


### Área Convexa

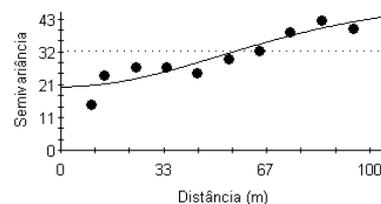
#### Matéria Orgânica



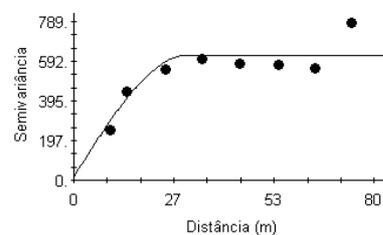
#### Argila



#### CTC



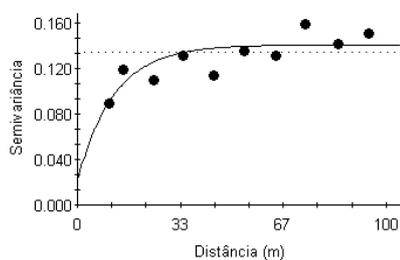
#### CTC da Argila



Apêndice 2. Modelos ajustados aos semivariogramas experimentais dos atributos: matéria orgânica ( $\text{g dm}^{-3}$ ), argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ), CTC do solo ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) e CTC da argila ( $\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) na profundidade de 0,20-0,40 m.

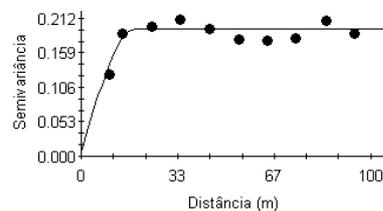
### Área Côncava

#### Área do pico da caulinita

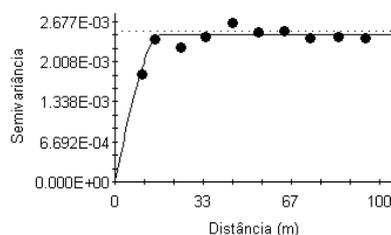


### Área Convexa

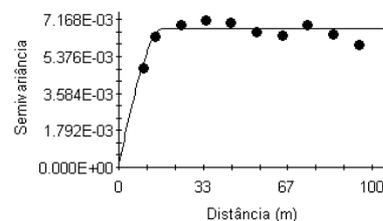
#### Área do pico da caulinita



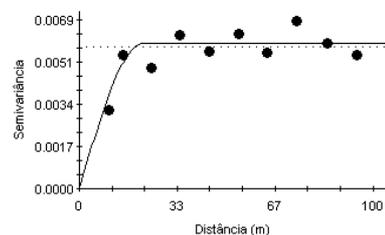
#### Área do pico da gibbsita



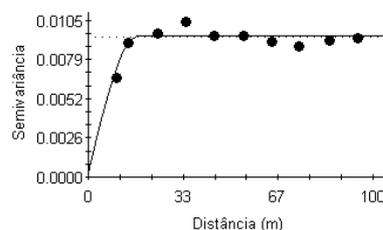
#### Área do pico gibbsita



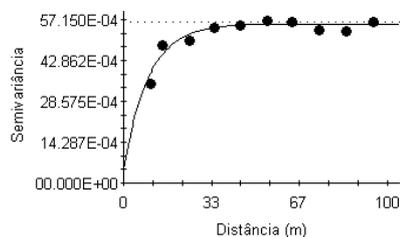
#### LMA - Caulinita



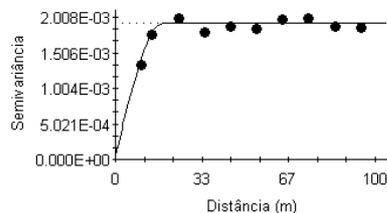
#### LMA - Caulinita



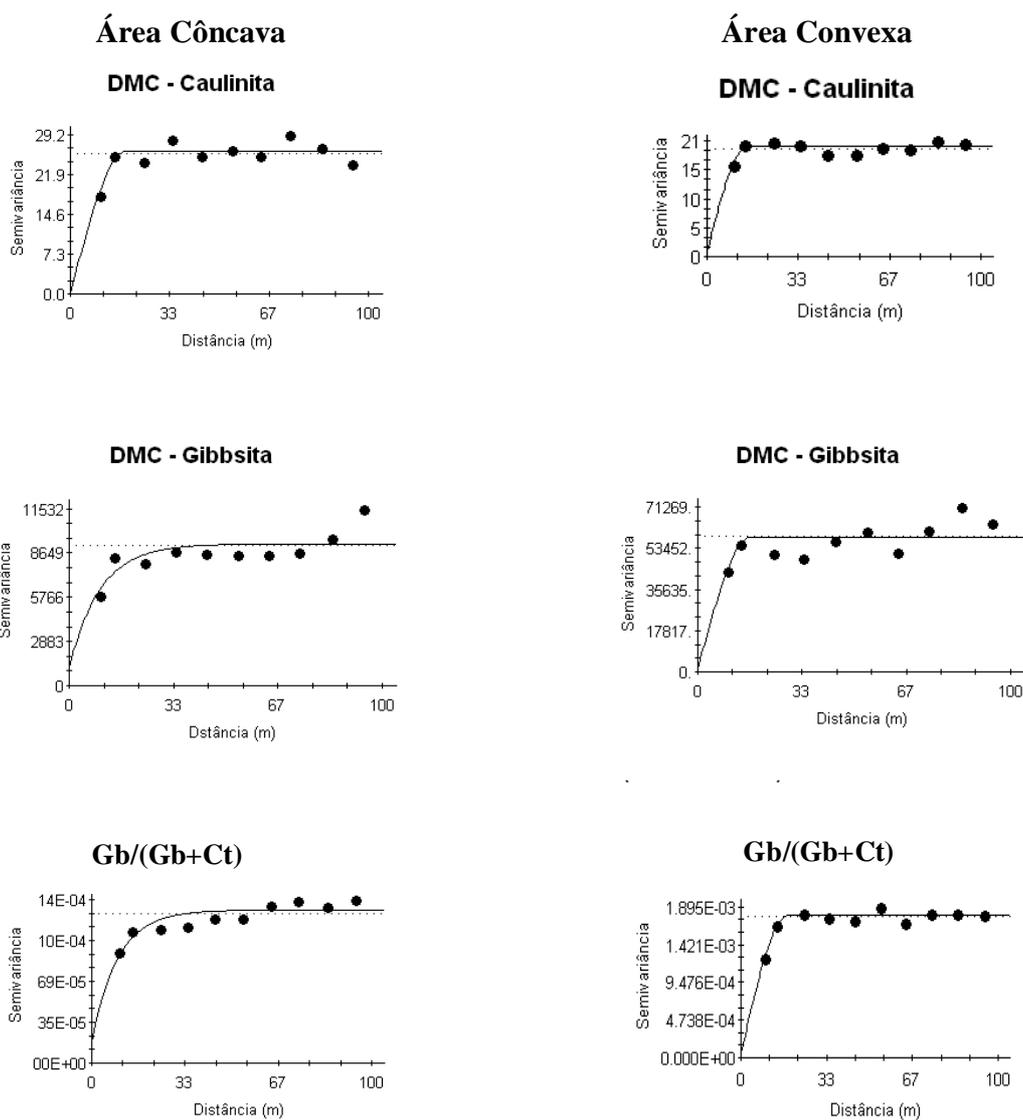
#### LMA - Gibbsita



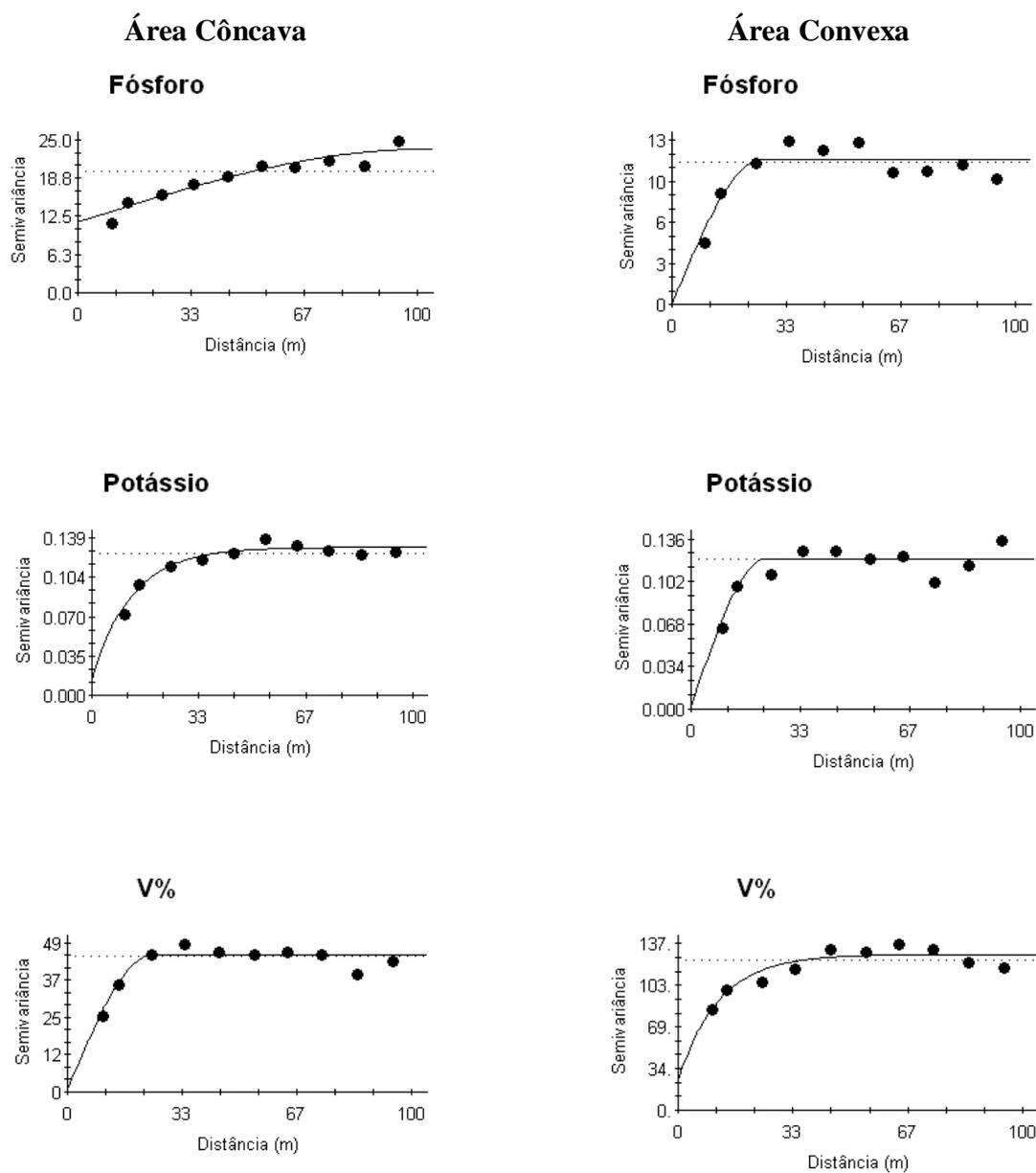
#### LMA - Gibbsita



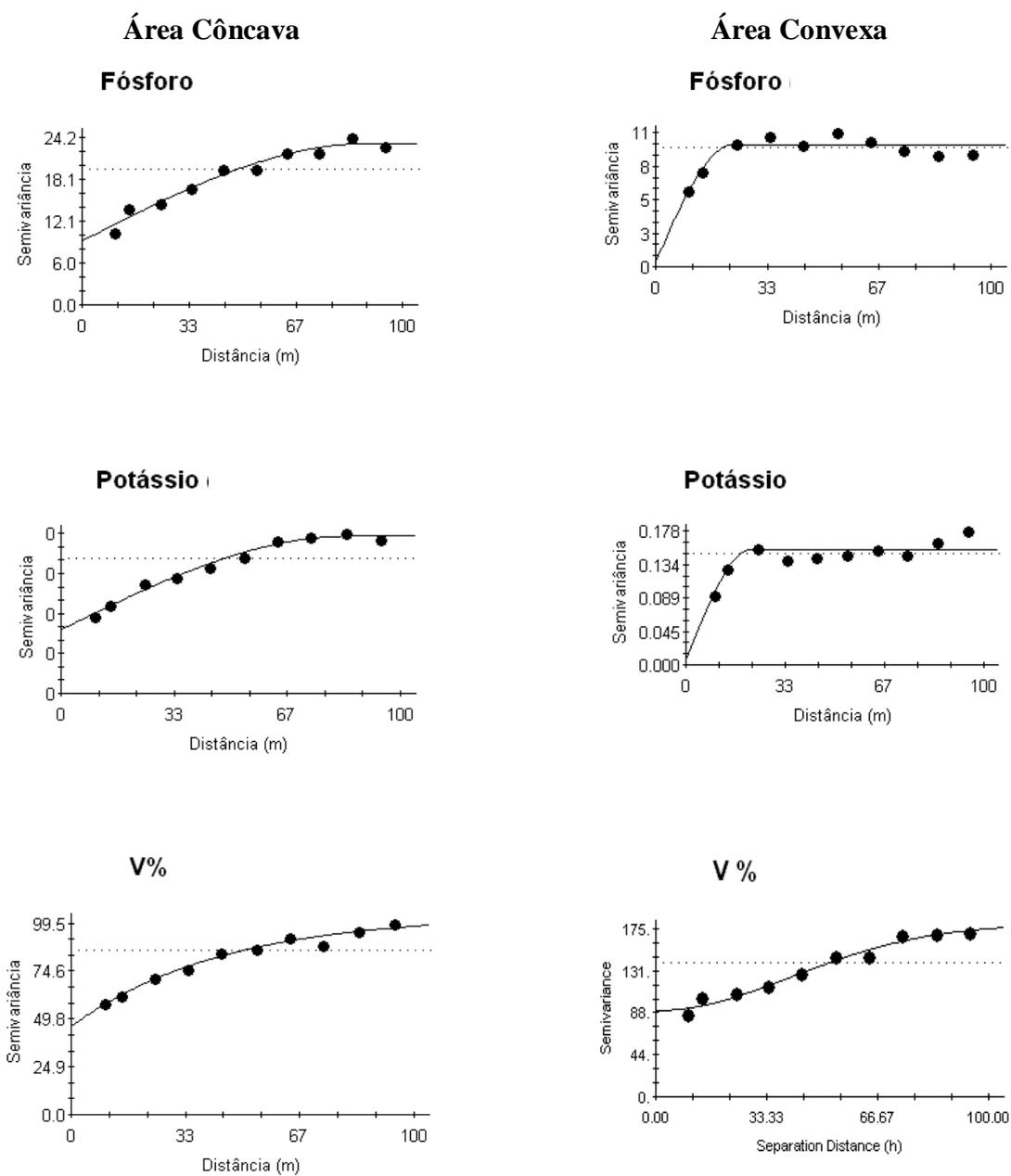
Apêndice 3. Modelos ajustados aos semivariogramas experimentais dos atributos: área do pico ( $\text{cm}^2$ ) e largura a meia altura (LMA) ( $^\circ 2\theta$ ) da caulinita e gibbsita na profundidade de 0,20-0,40 m.



Apêndice 4. Modelos ajustados aos semivariogramas experimentais dos atributos: diâmetro médio do cristal (DMC) (nm) da caulinita e gibbsita e relação caulinita/caulinita+gibbsita (Gb/Gb+Ct) na profundidade de 0,20-0,40 m.



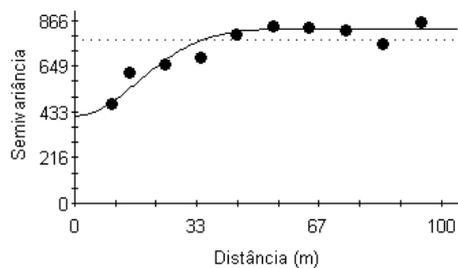
Apêndice 5. Modelos ajustados aos semivariogramas experimentais dos atributos fósforo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), potássio ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) e saturação por bases (V%) na profundidade de 00,00-0,20 m.



Apêndice 6. Modelos ajustados aos semivariogramas experimentais dos atributos fósforo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), potássio ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) e saturação por bases (V%) na profundidade de 0,20-0,40 m.

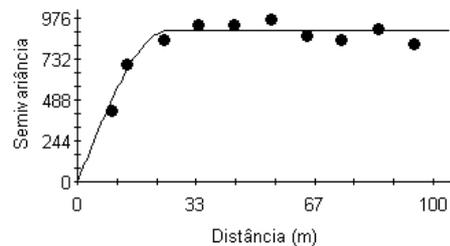
### Área Côncava

#### Necessidade de Fósforo

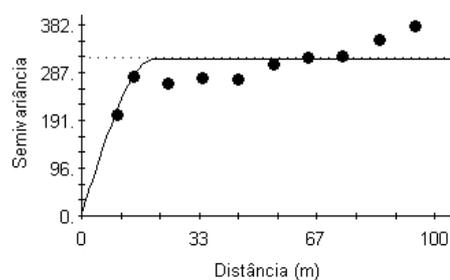


### Área Convexa

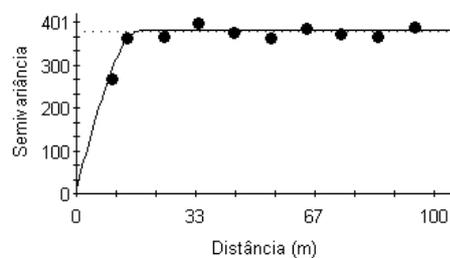
#### Necessidade de Fósforo



#### Necessidade de Potássio

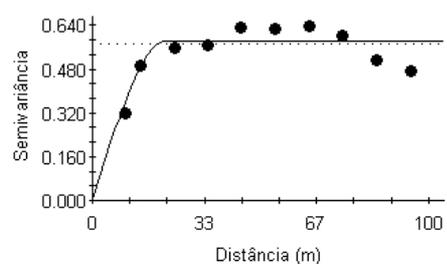


#### Necessidade de Potássio

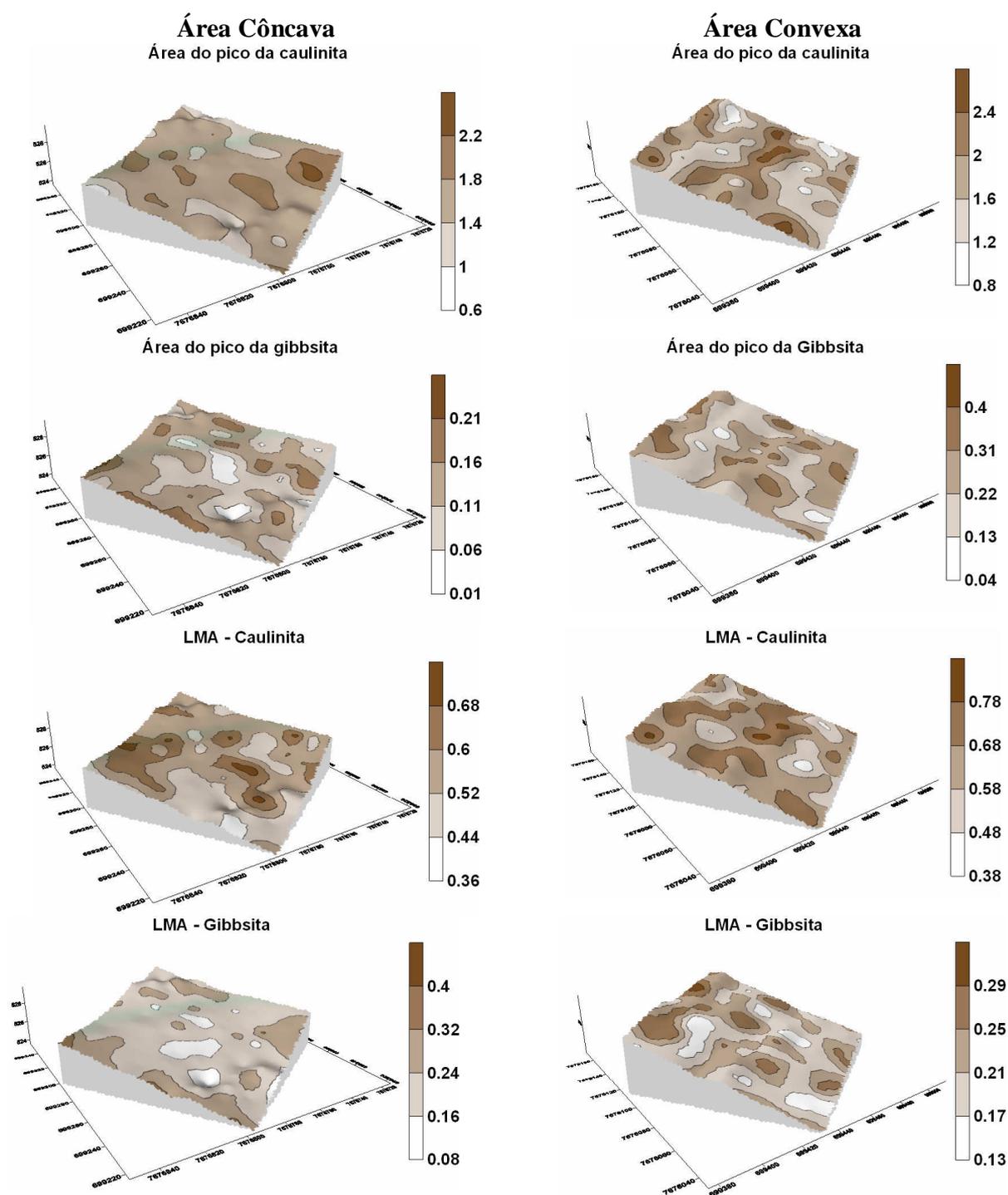


**Não há necessidade de calcário**

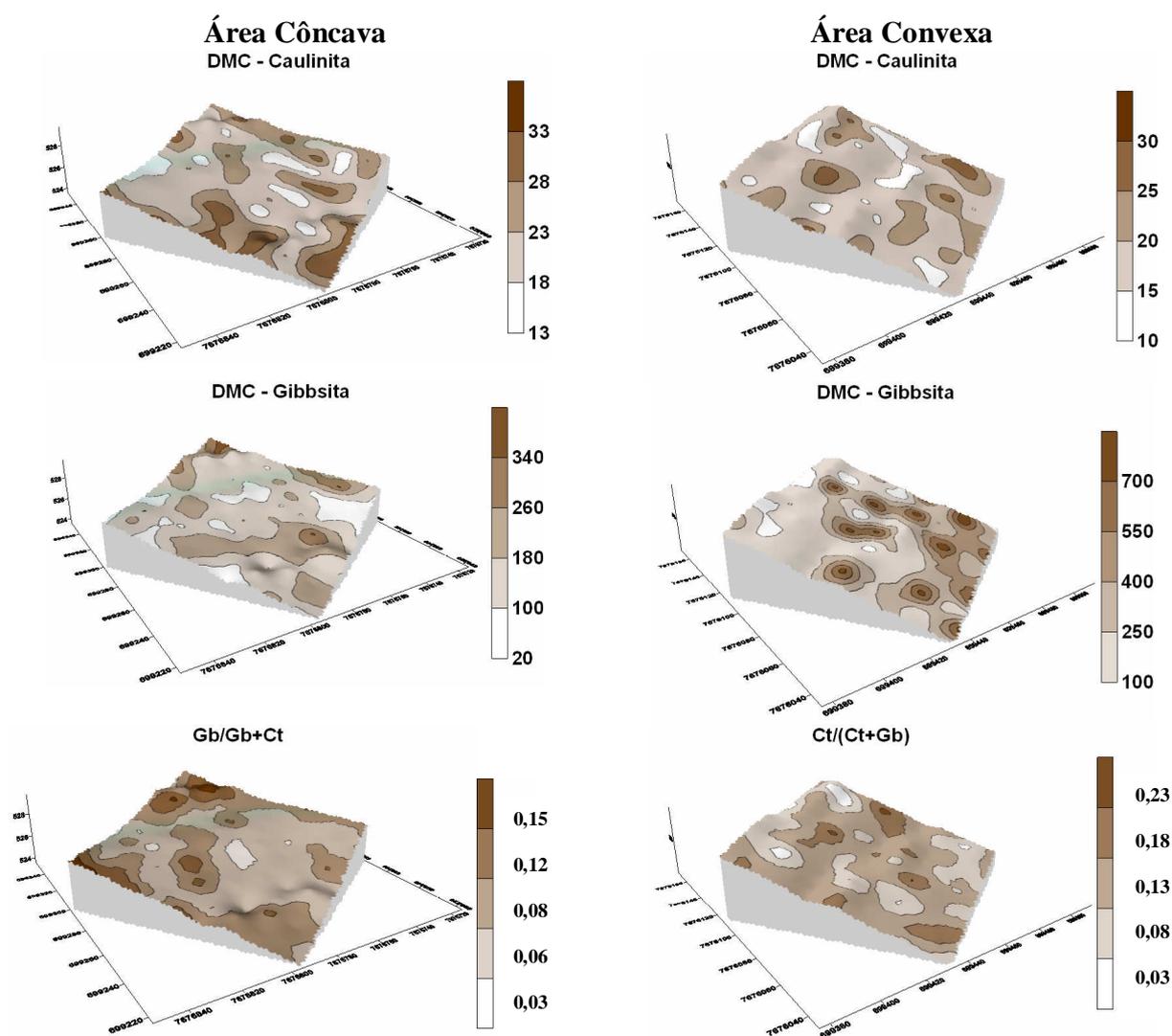
#### Necessidade de Calcário



Apêndice 7. Modelos ajustados aos semivariogramas experimentais das necessidades de aplicação de fósforo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), potássio ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e calcário ( $\text{t ha}^{-1}$ ) para as duas áreas estudadas.



Apêndice 8. Mapas de krigagem dos atributos área do pico ( $\text{cm}^2$ ) e largura a meia altura ( $^{\circ}2\theta$ ) da caulinita e gibbsita na profundidade de 0,20-0,40 m nas duas áreas estudadas.



Apêndice 9. Mapas de krigagem dos atributos diâmetro médio do cristal (nm) e relação Gb/(Gb+Ct) da caulinita e gibbsita na profundidade de 0,20-0,40 m nas duas áreas estudadas.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)