

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PREDIÇÃO DE FÓSFORO ADSORVIDO UTILIZANDO A  
SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA EM SOLOS SOB CULTIVO DE  
CANA-DE-AÇÚCAR**

**Katharine Viana Batista**

**Bióloga**

2018

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PREDIÇÃO DE FÓSFORO ADSORVIDO UTILIZANDO A  
SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA EM SOLOS SOB CULTIVO DE  
CANA-DE-AÇÚCAR**

**Katharine Viana Batista**

**Orientadora: Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira**

**Coorientadora: Dra.Livia Arantes Camargo**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do solo)

Jaboticabal  
2018

Batista, Katharine Viana  
B333e Predição de fósforo adsorvido utilizando a suscetibilidade magnética em solos sob cultivo de cana-de-açúcar / Katharine Viana Batista. - Jaboticabal, 2018  
xii, 38 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018  
Orientador: Gener Tadeu Pereira  
Coorientadora: Lívia Arantes Camargo  
Banca examinadora: Alan Rodrigo Panosso, Diogo Mazza Barbieri  
Bibliografia

1. Geoestatística. 2. Krigagem ordinária. 3. Proporção amostral I.  
Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU-631.41:633.61



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal




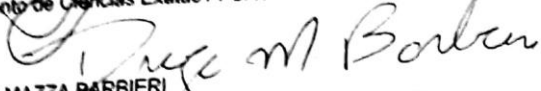
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

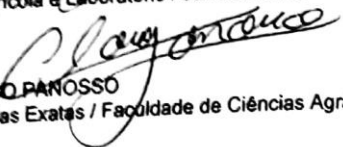
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO PREDIÇÃO DE FÓSFORO ADSORVIDO UTILIZANDO A SUSCETIBILIDADE  
MAGNÉTICA EM SOLOS SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

AUTORA: KATHARINE VIANA BATISTA  
ORIENTADOR: GENEZ TADEU PEREIRA  
COORIENTADORA: LÍVIA ARANTES CAMARGO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. GENEZ TADEU PEREIRA  
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Dr. DIOGO MAZZA BARBIERI  
Athenas Consultoria Agrícola e Laboratório / Jaboticabal/SP

  
Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO  
Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Jaboticabal, 01 de agosto de 2018

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**KATHARINE VIANA BATISTA** - Filha de José Raimundo da Silva Batista e Lusimar Viana Batista. Nascida em 9 de agosto de 1988 na cidade de Santa Luzia/ Maranhão. Iniciou o curso de graduação em março de 2010 no Centro de Ciências Agrárias e Ambientais (CCAA) na Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Durante a graduação foi bolsista voluntária em projetos de pesquisas voltados para área de Ecologia vegetal, Entomologia agrícola, forense e Biologia Molecular. Bolsista de extensão durante os anos de 2011 e 2012 trabalhando com projetos voltados para área de botânica. Fez graduação sanduíche como bolsista CAPES/CNPQ e IIE (Institute of International Education), onde foi selecionada para fazer intercâmbio pelo programa Ciência sem Fronteira, o qual fez o curso de inglês como segunda língua oficial, e cursou disciplinas do curso de Ciências Biológicas, estudando na Kent State University, no estado de Ohio, Estados Unidos, durante o período de agosto de 2013 à Dezembro de 2014. Em 2016 obteve o grau de Licenciada e Bacharela em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Maranhão. Iniciou o mestrado no curso de pós-graduação em Agronomia com ênfase em Ciência do Solo na UNESP/FCAV campus de Jaboticabal (2016). Bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES. Membro do grupo de pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP campus de Jaboticabal. Trabalhando com temas voltados para a área de geoestatística, agricultura de precisão, modelagem e suscetibilidade magnética.

*“A persistência é o caminho do êxito”*

**Charles Chaplin**

*Em gratidão ao meu amado avô Francisco Viana por todo amor dispensado não só a mim, mas principalmente a minha mãe, por sua história de vida, lutas, incentivos, confiança, força e respeito.*

**DEDICO**

*Aos meus pais José Raimundo da Silva Batista e Lusimar Viana Batista por me educarem, por serem presentes na minha vida e por sonharem junto comigo.*

**OFEREÇO**

## AGRADECIMENTOS

À Deus obrigada por me dar a vida.

À meus pais José Raimundo da Silva Batista e Lusimar Viana Batista, por serem pais exemplares, por todo amor, dedicação na criação, empenho, palavras de carinho e gratidão sempre. Sem vocês me dando suporte isso tudo que temos conquistado não seria possível. Foram momentos difíceis para todos nós, mas conseguimos mais essa vitória.

À meu orientador prof. Dr. Gener Tadeu Pereira que foi paciente durante este período e não mediu esforços para me ajudar e ensinar. Me propôs esse desafio, e não duvidou que eu fosse capaz de desenvolver esta pesquisa.

À minha coorientadora Dr<sup>a</sup>. Livia Arantes Camargo por todos os ensinamentos, sem dúvidas aprendi muito com você.

Aos professores que participaram da banca do Exame Geral de Qualificação, prof. Dr Alan Rodrigo Panosso e prof. Dr. Marcílio Vieira Filho, todas as contribuições foram de extrema valia para este trabalho.

Aos participantes da banca de defesa Dr. Diogo Barbieri e prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso, a minha gratidão.

À meus irmãos Acácia Káris, Berenice Batista, Fillemon Batista, Jairon Batista pelo amor, incentivo e apoio sempre.

À meus avós Francisco Viana e Rosa Viana pelo amor, e por todas as orações que me fortalecem todos os dias.

À meus amigos do Departamento de Ciências Exatas Bruna Oliveira, Ludhana Veras, Camila Vieira da Silva, Kárita Almeida, Taynara Valeriano, Gabriela Almeida, Maria Elisa Vicentini, Mary Jane, Paulo Alexandre, Deizi Nogueira, Jeferson Martins sem dúvidas os dias foram melhores e mais alegres na companhia de vocês.

À Kamila Cunha de Meneses, pois iniciamos essa caminhada no mesmo período, passamos dias difíceis, que até hoje eu pergunto a Deus o “Por quê”, mas creio que



tudo foi aprendido, e que até mesmo os dias mais nublados nos fizeram fortes. Obrigada.

À Aline Moreno, Valter, obrigada pelo cuidado, pelas caronas, conversas e pelas dicas de direção, vocês são especiais.

À Gustavo André Araújo dos Santos pela amizade sincera que construímos ao longo dessa jornada. Muito obrigada por me ouvir, dar conselhos, por me ajudar, cuidar de mim, por ser quem você é, por me mostrar que todos os dias nós podemos ser pessoas melhores. Sem dúvidas sou grata a Deus por ter você comigo, obrigada pela paciência, pelo amor, por compartilhar sempre comigo os seus momentos.

À Victor Brunini Moreto, obrigada por cada risada, palavras de incentivo, sinceridade e por me ouvir. Obrigada pela reciprocidade existente entre a gente. Você me conhece, e sabe que por aqui os dias não foram fáceis. Obrigada por estar comigo até mesmo nos dias em que eu não me aguento. Obrigada pela paciência e por não desistir de mim, por me fazer querer ser alguém melhor. Você é muito especial e importante pra mim. A gente se entende, você me dá suporte e acredita em mim. Obrigada por existir e por me fazer sentir você pertinho mesmo quando estava longe fisicamente. Você tem um coração bom e me sinto agraciada com isso.

À Daniel de Bortoli Teixeira pela orientação, por ter sido amigo, incentivador, obrigada por cada sugestão e correção durante a escrita do meu trabalho. Obrigada por me ensinar desde o começo, e pela oportunidade de aprender com você.

À Thiago de Andrade Águas por todas as contribuições nas correções, dicas de escrita, pelo suporte, ajuda e por todas as palavras de incentivo.

À Cristiano Marchesi obrigada por sua disponibilidade em me ensinar, pelas correções da dissertação, por tirar dúvidas sempre que possível .

À Renata Cristina Costa por todas as correções, incentivos e sugestões na escrita.

À Mara Regina pela recepção, carinho.

As minhas amigas Deizi Cristina Santos e Jardeani Mendes, obrigada pela amizade, pelas palavras de ânimo, e apoio. Vocês são uma benção de Deus na minha vida.

À Maydson Meneses pela amizade, palavras sábias em momentos decisivos.

À Gerlane Araújo, amiga sua amizade é importante, obrigada pelos dias de alegria que você me traz.

À Elder Maia Goltzman obrigada pela amizade de longa data, pelo suporte, conselhos e incentivos, você é meu orgulho.

À meu tio Raimundo Marques, pelo cuidado com meus pais e comigo aqui, você e sua família são especiais para nós.

À Nilcilene Batista, tia obrigada pelos ensinamentos, correções de trabalhos, pelas dicas e incentivos.

À Rosélia Sales, Daniel Viana e Felipe Sales, obrigada por estarem perto, cuidarem dos meus pais enquanto estou longe, amo vocês demais.

À Eduardo Arouche por todo carinho, e incentivo, obrigada pela oportunidade de orientar e aprender.

À Hugo Borges pelo exemplo de pessoa, pela vontade de viver com o sentimento de de gratidão à Deus todos os dias.

À Luciane Gomes e Laícia Leite por serem amigas que me acompanham até mesmo nas jornadas mais difíceis, vocês são minha força.

À Gildene Brito e Conceição de Maria pelos anos de convivência na graduação, e mesmo cada uma morando em um estado nossa amizade não muda.

À Fabiana Carvalho e Luana Mariano pela amizade de longa data, pelos dias de alegria. Vocês deixam até os dias nublados mais divertidos.

À Laércio Santos por todas as correções e colaboração com o trabalho. Obrigada.

À Simone Gomes e Nélida Elizabeth, obrigada pela amizade, pelo apoio e incentivos sempre.

À Juliana Mariano pela amizade e carinho.

À Psicóloga Priscila Fioresi pela compreensão, por se mostrar além de profissional, uma amiga para meus dias difíceis, cada “encontro” sem dúvidas foi importante para essa conquista, muito obrigada pela dedicação e empenho.

À Diego Silva Siqueira por todos os ensinamos como professor, pelo apoio e palavras de incentivos. Obrigada.

As funcionárias do Departamento de Ciências Exatas Maria José Tenório, Shirley Aparecida, Adriana Takakura que sempre se mostraram presentes, dedicadas, e cuidadosas comigo.

À meus alunos da turma de Inglês da UNATI que acompanharam de perto os dias de correria, obrigada pelo incentivo e carinho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À UNESP/FCAV pela oportunidade de ingressar em um programa de pós graduação em uma universidade renomada e por me proporcionar conhecer profissionais excelentes.

Ao Departamento de Ciências Exatas, pela oportunidade de conviver com profissionais maravilhosos, e por conhecer pessoas que sem dúvidas foram essenciais para meu crescimento.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), pela oportunidade de cursar um mestrado.

Ao grupo de pesquisa CSME (Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico) por ceder o banco de dados para o desenvolvimento da pesquisa, e apoio.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>xiv</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>xv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>3</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>6</b>
3.1 Localização das áreas de amostragem.....	<b>6</b>
3.2 Análises laboratoriais.....	<b>8</b>
3.3 Análises geoestatísticas .....	<b>8</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>23</b>
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>24</b>

## **PREDIÇÃO DE FÓSFORO ADSORVIDO UTILIZANDO A SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA EM SOLOS SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**RESUMO** – O solo submetido as operações agrícolas intensa e repetitivas  
RESUMO - O fósforo é considerado um dos nutrientes que limitam o desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar em solos brasileiros. Além disso, apresenta grande variabilidade espacial devido aos atributos que influenciam sua adsorção ao solo. O objetivo do trabalho foi mapear o fósforo adsorvido (Pads) com o auxílio da susceptibilidade magnética (SM) e definir a proporção amostral para a caracterização da dependência espacial do Pads. Foram coletadas 371 amostras na profundidade de 0-0,25 m com separação entre as amostras de 145 m a 174 m, abrangendo uma área total de aproximadamente 870 ha. Em cada ponto amostral determinou-se a susceptibilidade magnética (SM), o fósforo adsorvido (Pads). Os dados foram analisados a partir da estatística descritiva e da geoestatística. Na utilização da técnica da cokrigagem de Pads com o auxílio da SM sendo que uma a cada 2,6, assim foram estabelecidas as seguintes proporções amostrais (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 ha) e foram obtidos os mapas de cokrigagem. A acurácia das estimativas foi realizada utilizando a validação externa e a Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE). Os valores de alcance para as variáveis estudadas variaram de 1861,78 a 2081,68m. A partir desse resultado conclui-se que o Pads apresenta dependência espacial com a SM, indicando seu uso no mapeamento e na identificação de áreas com diferentes potenciais de adsorção de fósforo, e interpolação com co-krigagem utilizando a SM funciona até a proporção amostral 6 pontos por hectare, ou seja, para cada ponto de Fósforo adsorvido pode-se utilizar até 5 pontos de susceptibilidade magnética.

**Palavras-chave:** geoestatística, krigagem ordinária, proporção amostral

## ADSORVED PHOSPHORUS ESTIMATION USING MAGNETIC SUSCEPTIBILITY IN SUGARCANE CULTIVATION AREAS

**ABSTRACT:** Phosphorus is considered one of the nutrients that limit the development of sugarcane cultivation in Brazilian soils. In addition, it is an element that presents great spatial variability due to the attributes that influence it is adsorption to the soil. The objective of this study was to map the adsorbed phosphorus with the aid of magnetic susceptibility and to define the sample proportion for the characterization of the spatial dependence of the  $P_{ads}$ . A total of 371 samples were collected at a depth of 0-0.25 m with a separation between samples of 145 m and 174 m, covering a total area of approximately 870 ha. At each sampling point the magnetic susceptibility (SM), the adsorbed phosphorus ( $P_{ads}$ ) was determined. Data were analyzed from descriptive statistics and geostatistics. In the use of the cokriging technique of  $P_{ads}$  with the aid of SM, one of each being 2.6, the following sample proportions were established (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 ha), and the cokriging maps were obtained. The accuracy of the estimates was performed using the external validation and the Square Root of the Mean Error (RMSE). The range values for the studied variables ranged from 1861.78 to 2081.68m. From this result, it is concluded that the  $P_{ads}$  presents spatial dependence with SM, indicating their use in mapping and identifying areas with different phosphorus adsorption potentials, and interpolation with co-kriging using the SM works up to the sample proportion 6 points per hectare, that is, for each point of adsorbed phosphorus can be used up to 5 points of magnetic susceptibility.

**Keywords:** geostatistics, ordinary kriging, sample proportion

**LISTA DE TABELAS**

	Pág
<b>Tabela 1.</b> Estatística descritiva para suscetibilidade magnética (SM) e fósforo adsorvido ( $P_{ads}$ ) nas densidades amostrais avaliadas.....	12
<b>Tabela 2.</b> Estatística descritiva para o Fósforo adsorvido ( $P_{ads}$ ) nas proporções amostrais avaliadas.....	14
<b>Tabela 3.</b> Modelo e estimativa dos parâmetros dos variogramas para fósforo adsorvido ( $P_{ads}$ ) e suscetibilidade magnética (SM) e das proporções amostrais.....	15
<b>Tabela 4.</b> Índice de melhoria relativa das proporções amostrais (IMR).....	22

## LISTA DE FIGURAS

	Pág
<b>Figura 1</b> Localização da área de estudo e malha amostral.....	6
<b>Figura 2</b> Modelo digital de elevação da área de estudo.....	7
<b>Figura 3</b> Variograma experimental do fósforo adsorvido- $P_{ads}$ (a) e suscetibilidade magnética -SM (b).....	16
<b>Figura 4</b> Variograma experimental cruzado do $P_{ads}$ e SM, modelo esférico para todas as proporções amostrais.....	18
<b>Figura 5</b> Mapas de padrão espacial da suscetibilidade magnética (a) e fósforo adsorvido (b) na proporção amostral 2.6ha.....	19
<b>Figura 6</b> Mapas de Krigagem do $P_{ads}$ (2.6 ha) e cokrigagem das demais proporções amostrais.....	21



## 1 INTRODUÇÃO

O fósforo é um macronutriente decisivo no desenvolvimento das plantas. As limitações na disponibilidade de fósforo (P) no início do ciclo vegetativo podem resultar em restrições no seu desenvolvimento, podendo não se recuperar posteriormente, mesmo aumentando o suprimento de P a níveis adequados. Sua aplicação exige grande investimento em razão do alto custo dos fertilizantes fosfatados e da necessidade de grandes quantidades para manter a produtividade viável (KRUSE et al., 2015). Os solos brasileiros são no geral pobres em fósforos e isso é devido ao processo de dessorção ao solo que o fósforo apresenta, e isso por meio da dessorção e precipitação (BROGGI et al., 2010; GARCIA et al., 2011).

O baixo conteúdo de (P) nos solos tropicais é uma característica atribuída a escassez deste elemento no material de origem bem como aos avançados processos de pedogênese desses solos (FINK et al., 2016). Tais solos são altamente desenvolvidos, e, desempenham papel de dreno, visto o domínio quase absoluto de óxidos de Fe como goethita ( $Gt = \alpha\text{FeOOH}$ ), hematita ( $Hm = \alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e Al, a exemplo da gibbsita na fração argila que apresentam alta adsorção de fosfato (SIMÕES NETO et al., 2009; FROSSARD et al., 2011; TIECHER et al., 2012).

Além dos atributos mineralógicos do solo, a textura é um atributo físico que também influencia no fenômeno de adsorção de P (ROLIM NETO et al., 2004). Vários estudos ressaltam que solos de textura arenosa apresentam baixo potencial de fixação de P, já que a areia é praticamente desprovida de carga de superfície. A forte retenção de P em solos argilosos deve-se a maior área de superfície específica e a quantidade de sítios adsorptivos (SIMÕES NETO et al., 2009). Diante disso, o mecanismo de adsorção de P é regido por processos físico-químicos, de interações eletrostáticas (HUNT et al., 2007; SIMPSON et al., 2011; GOMES et al., 2017).

Em virtude dessa complexidade, o Pads no solo apresenta padrão espacial heterogêneo nas áreas de produção, sendo necessário o conhecimento dessa variabilidade espacial da adsorção de P para o planejamento agrícola de aplicação mais específicas de adubações fosfatadas, diminuindo, assim o custo e impacto ambiental principalmente.

Entretanto, a caracterização da variabilidade espacial do P pelos métodos convencionais torna-se inviável. Entre as dificuldades destaca-se o grande número de amostras necessária, mão-de-obra e análises laboratoriais, e ainda a morosidade dos resultados analíticos. Ou seja, a relação custo-benefício- tempo impossibilita o conhecimento do padrão espacial de P pelos métodos clássicos. Uma alternativa tem sido a adoção de métodos indiretos, como por exemplo a utilização da suscetibilidade magnética (SM) e métodos estatísticos, como a geoestatística (SIQUEIRA et al., 2010; PELUCO et al., 2013; GOMES et al., 2017)

Modelagem matemática para estimar atributos de difícil obtenção a partir de dados de fácil obtenção são denominadas de pedotransferência (NASCIMENTO et al., 2010b). Neste propósito, pode-se utilizar a suscetibilidade magnética (SM) para avaliar determinados atributos do solo, de maneira simples, sem impacto ambiental, e de custo considerado relativamente baixo, além de ser um procedimento rápido de ser realizado (BAHIA et al., 2015).

Essa técnica tem sido utilizada como indicador geofísico, no intuito de mapear áreas de gerenciamento distintas e estimar diferentes propriedades do solo (MATIAS et al., 2013; CAMARGO et al., 2014, 2016). Considerando que a SM está relacionada aos minerais que adsorvem fósforo, esta pode ser utilizada como uma variável auxiliar na precisão de mapas (PELUCO et al., 2015; MATIAS et al., 2014, 2015). Portanto, a SM auxilia no estudo de propriedades mineralógicas, físicas e químicas do solo (SIQUEIRA et al., 2010), conseqüentemente, na definição de zonas de manejo específico (TORRENT et al., 2010; SIQUEIRA et al., 2010b; SOUZA JUNIOR et al., 2010; MATIAS et al., 2013; SILVA, 2016).

Assim, como a geoestatística permite avaliar o comportamento do atributo no espaço, a combinação desta informação com as informações obtidas por funções de pedotransferência, permite o mapeamento do Pads para auxiliar na tomada de decisão de manejo da cultura. Portanto a hipótese do presente estudo é que a SM pode ser utilizada para prever o Pads em solo sob cultivo de cana-de-açúcar, tendo como objetivo mapear o Pads com o auxílio da SM do solo, definir a densidade amostral para a caracterização da dependência espacial entre Pads e SM e das zonas de manejo específico.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

O Brasil é líder mundial em produção de cana-de-açúcar. A cultura da cana-de-açúcar apresenta função estratégica nos setores principalmente energético e alimentício para a safra 2017/2018. Estima-se uma produção de 635,6 milhões de toneladas, e uma redução que chega em torno de 3,3% em relação à safra anterior (CONAB,2017). A expansão dos campos de cana no Brasil foi intensificada devido à crescente demanda de biocombustíveis, especialmente da produção de açúcar e etanol (FERREIRA JÚNIOR et al., 2012; MOURA FILHO et al., 2014).

A produtividade da cana-de-açúcar está diretamente associada a nutrição mineral. Devido a sua alta produção de biomassa e a exportação dos nutrientes. Durante a colheita é necessário fazer reposições periódicas através da adubação (SOUSA et al, 2015, Oliveira et al, 2007). O Fósforo (P), é um dos nutrientes mais limitante para o crescimento da cana (CALHEIROS et al, 2012), este é responsável por promover aumento da produtividade, por isso existe uma deficiência natural deste elemento nos solos tropicais, assim há a necessidade de adição de fósforo nas áreas cultiváveis.

Por isso, a aplicação do fósforo na cultura da cana de açúcar tem sido uma prática bastante preconizada, pelo fato deste elemento proporcionar melhorias no desenvolvimento da planta e a sua deficiência contribuir para queda da produtividade da cultura ao reduzir o perfilhamento, o crescimento do sistema radicular impedindo que a planta explore uma maior camada de solo em busca de água e nutrientes e com menor resultado na produtividade de colmos.

O fósforo é determinante para o desenvolvimento das plantas por participar de vários processos metabólicos, no armazenamento e transferência de energia (BRASIL, NASCIMENTO, 2010); por esse motivo é importante para a cana-de açúcar. A ausência desse elemento ocasiona menor desenvolvimento da parte aérea e com isso menor será a produção de fotossimilados para serem utilizados pela cultura durante seu ciclo.

A adubação fosfatada de plantio pode, de maneira geral, garantir o suprimento de fósforo para a cana-planta e a primeira rebrota (OLIVEIRA et al, 2007), quando esse nutriente é adicionado ao solo parte fica retido nos coloides do solo e a outra

parte é absorvido pelas plantas (KORNDÖRFER et al, 2009). Segundo Santos et al (2010) nos solos intemperizados além de baixa disponibilidade de fósforo há ocorrência de baixa capacidade de troca catiônica e elevada adsorção aniônica, essa combinação de fatores promove a adsorção do ânion fosfato e baixa a disponibilidade de bases transformando o solo em um dreno, quando deveria ser fonte desse nutriente.

A adsorção é um fenômeno físico-químico que consiste na retenção de moléculas e partículas em solução ou gasosas sobre a superfície de um suporte sólido, através de interações eletrostáticas. O fósforo (P) é considerado um dos elementos mais limitantes para o desenvolvimento das plantas. Porém, o fósforo aplicado para melhorar os níveis deste elemento na forma disponível para as plantas pode ser retido nas superfícies das partículas da fase sólida através da adsorção. Essa retenção tem relação direta com o teor de fósforo disponível, pois quanto maior for a retenção desse nutriente pelas partículas presentes no solo, menor o teor disponível e maior é quantidade de fertilizante necessário (SANTOS et al., 2011).

A forma de aplicação do fósforo também influencia na adsorção, pois quando aplicada direto no sulco de plantio encontra melhores condições de umidade (OLIVEIRA et al., 2007) e menor diluição do adubo no solo. Quando este nutriente é adicionado a lanço permite que a raiz tenha maior camada de solo para explorar, no entanto diminui a sua concentração no solo e aumenta o grau de adsorção transformando parte do fósforo para formas não-lábeis (BARRETO & FERNANDES, 2002). Essa retenção tem relação direta com o teor de fósforo disponível, pois quanto maior for a retenção desse nutriente pelas partículas presentes no solo, menor o teor disponível e maior é quantidade de fertilizante necessário (SANTOS, 2011).

De acordo com Veith e Sposito (1977), as reações de adsorção acontecem em duas etapas, uma rápida, onde acontece a adsorção propriamente dita, e uma mais lenta, que é chamada de precipitação. O estágio rápido pode ser visto em superfícies de hematita e gibbsita (KUO; LOTSE, 1974) e está, provavelmente, associado à alta energia de adsorção e à baixa saturação da superfície de adsorção. A adsorção do fósforo necessita do tipo e da cristalinidade dos óxidos de ferro e de alumínio, e pode ser acometida principalmente pela matéria orgânica, pois esta disputa com o íon fosfato pelos sítios de adsorção (PARFIT et al., 1975).

No Brasil, estudos têm demonstrado que os principais fatores que influenciam a adsorção de fósforo no solo são: teor e mineralogia da fração argila, teor de colóides amorfos, pH, alumínio trocável e matéria orgânica (NAKOS, 1987; MEHADI e TAYLOR, 1998; BRENNAN et al., 1994; KER et al., 1996; FONTES e WEED, 1996; OLIVEIRA et al., 2015). Moreira et al. (2006) comprovou que a matéria orgânica pode diminuir ou aumentar a capacidade do solo em adsorver fósforo e a adsorção de fósforo ocorre principalmente na fração argila, tendo, porém, a fração areia uma participação importante nos fenômenos relacionados com Pads.

Avaliando o uso da suscetibilidade magnética (SM) para estimar atributos de um Argissolo Vermelho-amarelo Siqueira et al.,(2010) encontraram correlações significativas com o teor de argila, a CTC e a capacidade de adsorção de fósforo. Esses autores concluíram que a SM pode ser utilizada em funções de pedotransferência. Em estudos realizados por Peluco et., al (2015), a SM apresenta dependência espacial com o Pads e há uma correlação positiva com este elemento. Com isso, apresenta potencial para ser utilizada como componente de função de pedotransferência, para quantificação indireta da adsorção de P desse elemento nos solos. Podendo também auxiliar no mapeamento e na identificação de áreas com diferentes potenciais de adsorção de P.

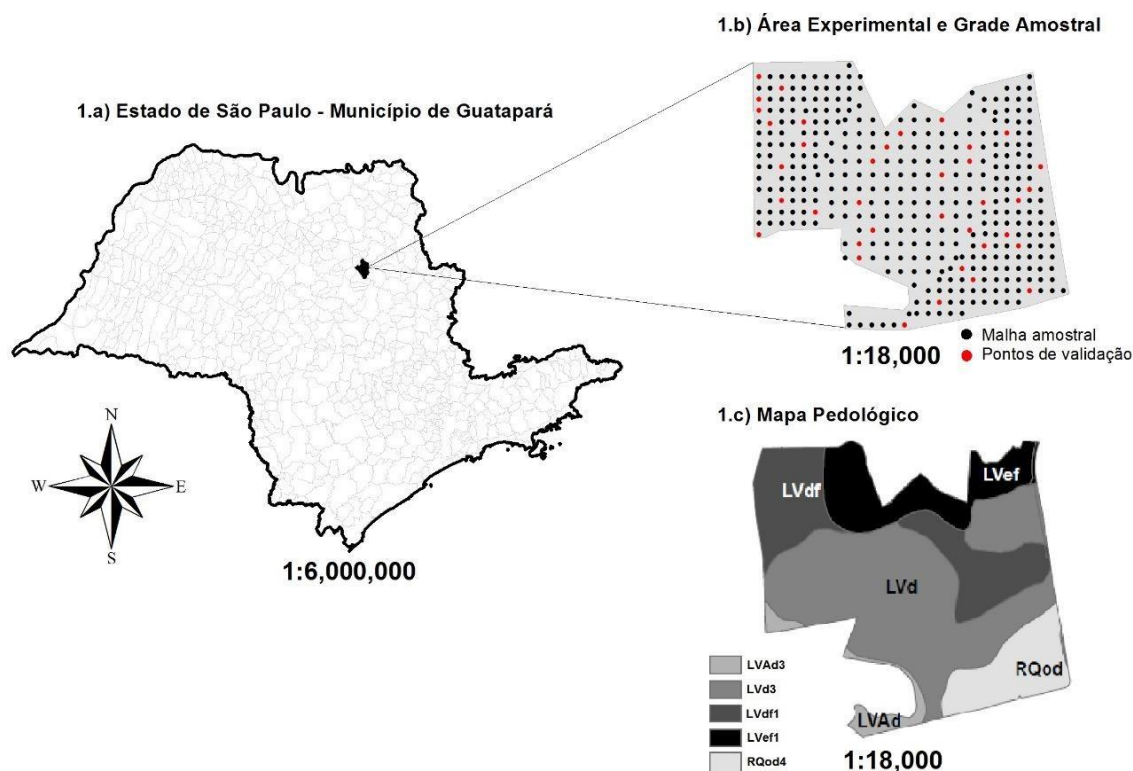
A geoestatística é a principal ferramenta utilizada para modelar a variabilidade espacial, e estimar os atributos do solo (MARQUES JÚNIOR et al., 2008). Dentre os métodos geoestatísticos, a krigagem ordinária (KO) é o estimador adotado na maioria dos estudos sobre a variabilidade espacial Camargo et al., (2013), e é método de interpolação que fornece estimativas não viesadas e de variância mínima (BURGESS & WEBSTER, 1980; TRANGMAR et al., 1985; VIEIRA et al., 2000). Esse efeito é uma característica da KO, a qual trabalha com o valor médio esperado e a sua variância dependente apenas das características do variograma ajustado e da distribuição dos dados (DEUTSCH & JOURNAL, 1998; SOARES, 2006).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

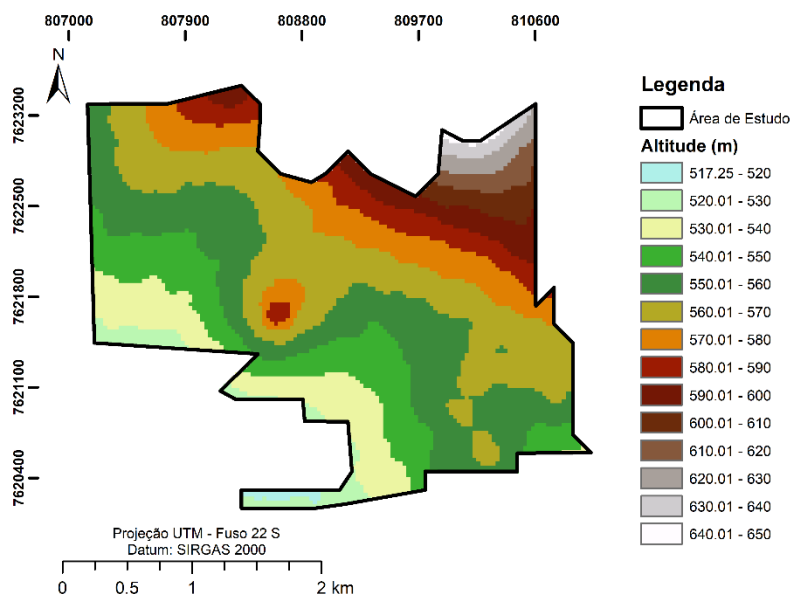
#### 3.1 Localização da área e amostragem

A área de estudo localiza-se no município de Guataporá, estado de São Paulo, Brasil (Figura 1). As coordenadas são 21°28'40" de latitude Sul e 48°01'38" longitude Oeste, com altitudes variando de 649 a 519 m acima do nível do mar. O clima da região foi classificado como B1rB'4a', Tipo Mesotérmico Úmido, com pequena deficiência hídrica, sendo a evapotranspiração de verão menor que 48% da evapotranspiração anual (THORNTHWAITE, 1948).

A geologia da área apresenta três formações principais (Serra Geral, Depósitos coluvio-eluvionares e Depósito aluvionar). A área era constituída por floresta tropical subcaducifólia, sendo atualmente cultivada com cana-de-açúcar sob sistema de colheita mecanizada por mais de 10 anos. Dentro da área foram classificadas cinco classes de solos correspondentes as ordens de Latossolos e Neossolos.



**Figura 1.** Localização da área de estudo(1a); Malha amostral(1b); Mapa pedológico(1c)



**Figura 2.** Modelo digital de elevação da área de estudo

Os dados utilizados fazem parte do banco de dados do grupo de pesquisa CSME (Caracterização do Solo para fins de manejo Específico), Coordenado pelo Prof. Dr. Marques Júnior, e pesquisadores renomados como Dr. Newton La Scala Júnior. (<http://www.csme.com.br>). Dados utilizados em projetos aprovados pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), e trabalhados por pesquisadores renomados aqui do próprio campus da FCAV.

Nesta área foram encontrados solos derivados de basalto, depósito colúvio-eluvionar e depósito aluvionar (CPRM, 2012). Os solos cultivados com cana-de-açúcar com a utilização de colheita mecanizada, foram classificados em: Latossolo Vermelho distrófico, textura média (LVd3.4); Latossolo Vermelho distroférico, textura argilosa (LVdf1.1); Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa (LVef1.1); e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média (LVAd3.1) (SANTOS et al., 2006).

Na área experimental foi instalada uma malha de amostragem regular contendo 371 pontos com separação entre as amostras de 145 m a 174 m, abrangendo uma área total de aproximadamente 870 ha. A proporção amostral inicial foi de 1 ponto a

cada 2,6 ha. A partir desta, foram estabelecidas as demais proporções amostrais (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13,14 e 15 ha respectivamente).

### 3.2 Análises laboratoriais

A SM foi quantificada em aparelho Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B seguindo metodologia descrita por (DEARING, 1994) em baixa frequência (0,47 kHz).

Para determinar os valores de P<sub>ads</sub> utilizou-se aproximadamente 2,0 g de terra fina seca ao ar, que foi colocada em um tubo de centrifuga de 50 ml. Colocou-se 20 ml de CaCl<sub>2</sub> 0,005 mol l<sup>-1</sup> com KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, em concentração de 100 mg l<sup>-1</sup> de fósforo. As amostras com as soluções de fósforo foram agitadas por 16 horas. Após este processo, a centrifugação foi realizada a 2.500 rotações por minuto, durante 15 min.

Coletou-se o sobrenadante para determinar a concentração de fósforo por meio de espectrofotômetro, após este procedimento foi transferida alíquota de 1 ml para tubo de ensaio, colocando-se 50 ml de sulfomolibdica e três gotas 200 g l<sup>-1</sup> de ácido ascórbico. A solução foi agitada separadamente por 30 segundos e esteve em repouso por 15 min. O comprimento de ondas no espectrofotômetro foi de 650 nm. O P<sub>ads</sub> foi calculado subtraindo-se o valor estabelecido em solução da quantidade total adicionada (FASSBENDER e IGUE 1967).

### 3.3 Análises geoestatísticas

As análises geoestatísticas foram realizadas nos programas estatísticos GS+ 10 (version 9.0; Gamma Software Design, 2008) Surfer 9 version 9.0; Golden Software, 2009) e R software (R development Core Team, 2018). Os dados foram submetidos à estatística descritiva (média, mediana, erro padrão, coeficiente de variação, mínimo, máximo, coeficiente de assimetria e curtose). O CV foi classificado com base no critério de Warrick e Nielsen (1980). A dependência espacial do P<sub>ads</sub> e da SM foram estimadas por meio dos variogramas experimentais (SOARES, 2006). Para o cálculo da validação externa foram escolhidos de forma aleatória 37 pontos



(10%) do conjunto original dos dados. O variograma cruzado foi utilizado para avaliar a correlação espacial existente entre o  $P_{ads}$  e SM.

Para estimar a semivariância a exigência do estimador de Matheron (1963) é que a variável a ser analisada deve ter distribuição normal aproximada, pressuposição apresentada por Fisher (1935). A semivariância distribui-se assim de zero quando  $h=0$ , até um valor igual à variância das observações para um alto valor de  $h$ , se os dados forem estacionários. Essas relações são mostradas quando a função  $\gamma(h)$  é colocada em gráfico contra  $h$  para originar o semivariograma experimental.

A distância segundo a qual  $\gamma(h)$  atinge um valor constante, denominado patamar é aproximadamente igual a variância à priori dos dados, e é chamada de alcance ou amplitude. Geralmente o patamar é representado por (C1) e o alcance por (a). A semivariância não é apenas igual à média das diferenças ao quadrado entre pares de pontos espaçados as distâncias  $h$ , mas também é igual à variância dessas diferenças: O variograma experimental descreve não só a dependência espacial que existe, mas também o alcance dessa dependência (VIEIRA et al., 1981). Sendo estimado por:

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

É o valor  $C_0$  em que,  $\hat{\gamma}(h)$  é a variância estimada;  $z(x_i)$  é  $N(h)$ : é o número de pares de pontos separados pela distância  $h$  no local  $(x_i)$ ; o variograma é representado pelo gráfico de  $\gamma(h)$  versus  $h$ . Na modelagem do variograma experimental foram estimados os coeficientes do modelo: efeito pepita ( $C_0$ ), patamar ( $C_0+C_1$ ) e alcance, (a).

A krigagem ordinária foi utilizada para a obtenção dos mapas de padrões espaciais do  $P_{ads}$ . Esta metodologia consiste na realização de uma média ponderada das amostras vizinhas, sendo os pesos ( $\lambda_i$ ) de cada amostra vizinha determinados por meio da semivariância em função de  $h$ , resultando em uma estimativa não viesada de variância mínima (ISAACS e SRIVASTAVA, 1989).

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (2)$$

Em que,  $\hat{z}(x_0)$  :é o valor estimado para locais não amostrados  $x_0$ ;  $\lambda_i$  ; é o peso associado com cada valor amostrado  $z(x_i)$ ;  $N$  é o número de valores no ponto 0;  $z(x_i)$  é o valor observado no ponto  $(x_i)$ .

A cokrigagem estende o princípio de uma estimação ótima usando a teoria de variáveis regionalizadas a partir de uma propriedade única para situações em que existem duas ou mais propriedades co-regionalizadas (JOURNEL e HUIJBREGTS, 1978). A cokrigagem é mais eficiente quando uma variável pode não ter sido suficientemente amostrada (devido ao alto custo, dificuldades experimentais etc.) para fornecer estimativas de precisão aceitável (MCBRATNEY e WEBSTER, 1983; VAUCLIN et al., 1983).

A distribuição espacial de qualquer propriedade dada pode muitas vezes estar fortemente relacionada com a de outras propriedades afetadas pelo mesmo fenômeno regionalizado ou processo espacial, sendo que a precisão da estimativa pode ser melhorada utilizando a correlação espacial entre a variável sub amostrada (primária) e outras covariáveis amostradas com maior frequência (TANGMAR et al., 1985).

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [z_1(x_i) - z_1(x_i + h)][z_2(x_i) - z_2(x_i + h)] \quad (3)$$

Em que  $\gamma_{12}(h)$  é a semivariância estimada;  $N(h)$  é o número de pares separados pelo vetor  $h$ ;  $z_1(x_i)$  é o valor da variável primária no ponto distante de  $h$  no ponto  $x_i$ ;  $z_1(x_i) + h$  é o valor da variável primária no ponto distante de  $h$  no ponto  $(x_i)$ ;  $z_2(x_i)$  é o valor da variável secundária no ponto  $x_i$ ;  $z_2(x_i+h)$  é o valor da variável secundária no ponto distante de  $h$  do ponto  $x_i$ .

Para a realização da validação foram escolhidos de forma aleatória 37 pontos (10%) do conjunto original de dados. A acurácia dos mapas de krigagem ordinária e co-krigagem do  $P_{ads}$  em cada proporção amostral foi avaliada a partir da estimativa do erro quadrático médio (RMSE) (LI e HEAP, 2008). No RMSE quanto mais próximo de zero é o valor do índice maior a acurácia da predição.

$$RMSE = n^{-1} \sum_{i=1}^n [Z_{obs}(x_i) - Z_{est}(x_i)]^2]^{0,5} \quad (4)$$

Onde  $n$  o número de valores utilizados na validação ( $n=37$ );  $Z_{est}(x_i)$  é o valor estimado ou predito no ponto  $i$ ;  $Z_{obs}$  é o valor observado no ponto  $i$ ; (da validação externa). O índice de melhoria relativa, mede a melhoria obtida usando informações secundárias no processo de interpolação em vez de valores observados.

$$I_{RSME} = \frac{RMSE_{OK} - RMSE_{CKO}}{RMSE_{OK}} \times 100 \quad (5)$$

Onde, o  $RMSE_{OK}$  e  $RMSE_{CKO}$  são os valores de RMSE obtidos pela interpolação dos valores obtidos utilizando-se a KO e CKO. As estimativas dos modelos de variograma e de OK e CKO foram obtidos usando o software GS + (versão 9.0; Gamma Software Design, 2008).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da estatística descritiva para a SM e o  $P_{ads}$  na densidade amostral 2.6ha são apresentados na (Tabela 1). A SM apresentou valor de média de 2281,23  $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  enquanto o  $P_{ads}$  de 505,98  $\text{mg dm}^{-3}$ . De acordo com o critério de Warrick e Nielsen (1980), os atributos apresentaram alta variabilidade espacial ( $CV > 24\%$ ), sendo maior variabilidade evidenciada para a SM ( $CV = 89,23 \%$ ). Assim, a SM apresenta CV maior o que pode estar relacionado à variação dos materiais de origem dos solos presentes no local do experimento. Essa variação pode ser justificada pela diversidade litológica, ou seja, solos derivados de basalto, depósito colúvio-eluvionar e depósito aluvionar. Portanto há uma grande sensibilidade deste atributo aos processos do solo que variam na paisagem, e que segundo Mathé et al., (2006), proporciona a utilização do uso da SM como micro indicadora das condições do solo.

Embora o CV tenha indicado alta variabilidade para SM e P<sub>ads</sub>, este parâmetro de dispersão é útil para comparação de variáveis de unidade diferentes, porém não permite considerar a variabilidade no espaço dos atributos do solo (GOMES et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2018). Neste caso, o uso da geoestatística torna-se fundamental para compreensão do padrão espacial, e para considerar a variável no espaço (VIEIRA, 2000; SIQUEIRA et al., 2016; TEIXEIRA et al., 2012).

A SM e o P<sub>ads</sub> apresentaram valores de assimetria e curtose próximos a zero (Tabela 1) caracterizando distribuição simétrica dos dados e mostrando-se adequados para a aplicação das técnicas geoestatísticas (WARRICK; NIELSEN, 1980). Avaliando também as amplitudes do conjunto de dados, mínimo (SM:14 x 10<sup>-8</sup>m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>/P<sub>ads</sub>: 931,07mg dm<sup>-3</sup>) e máximo (SM:931,07 x 10<sup>-8</sup>m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>/ P<sub>ads</sub> :101,49 mg dm<sup>-3</sup>) encontrados.

**Tabela 1.** Estatística descritiva para suscetibilidade magnética (SM) e Fósforo adsorvido (P<sub>ads</sub>) na proporção amostral 2,6ha.

<b>Estatísticas</b>	<b>SM (10<sup>-8</sup>m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P<sub>ads</sub> (mg dm<sup>-3</sup>)</b>
N	330	330
Média	2281,23	505,98
Erro padrão da média	115,84	9,17
Coef. de variação (%)	89,23	32,92
Mínimo	14,00	101,49
Máximo	7458,00	931,07
Assimetria	0,65	0,34
Curtose	-0,84	-0,48

CV = coeficiente de variação (%); Min = mínimo; Max = máximo;

As estatísticas descritivas referentes as 14 proporções amostrais avaliadas (Tabela 2) apresentaram valores de CV alto, e conforme o critério estabelecido por Warrick e Nielsen (1980) é considerado alta variabilidade espacial (CV > 24%), portanto as proporções amostrais com o CV mais alto foram: a proporção amostral 4ha com CV= 34,49%, 5ha com CV=33,91% e 7ha com CV=33,84%. Essa alta

variabilidade da SM reflete a grande sensibilidade deste atributo para indicar processos pedogenéticos.

Os valores de média e mediana encontrados foram próximos para todas as proporções amostrais avaliadas, sendo que estes valores ficaram entre 485,01 a 506,67 (menor e maior valor) para média, e 469,3 e 454,0 para mediana. Os valores de assimetria e curtose foram próximos à zero (Tabela 2). Segundo Camargo et al. (2016), a adsorção de fósforo nos solos está fortemente relacionada aos conteúdos de óxidos de ferro e de argila, que também influenciam diretamente o comportamento magnético dos solos (Fontes et al., 2000).

Gomes et al. (2017) estudando a relação da mineralogia da fração argila com o Pads no domínio geomorfológico do Planalto Ocidental Paulista observou médias de 738 e 295 mg kg<sup>-1</sup> em solos derivados de basalto e arenito, respectivamente. Melo et al. (2012) estudaram o Pads em alguns solos da Amazônia e encontraram médias de 701 mg kg<sup>-1</sup> para Latossolo Vermelho Amarelo distrófico e valores menores a 500 mg kg<sup>-1</sup> para Cambissolos, Nitossolos e Chernossolos.

**Tabela 2** Estatística descritiva para o Fósforo adsorvido ( $P_{ads}$ ) nas densidades amostrais avaliadas.

Variáveis	N	Média	Mediana	EP	Min	Max	CV	Coeficientes	
								Ass	Curt
SM	330	505,98	1384,0	115,84	101,49	931,07	32,92	0,34	-0,48
Pads	330	2281,23	473,9	9,17	14,00	7458,00	89,23	0,65	-0,84
2,6	308	506,67	1384,0	9,49	101,49	931,07	32,85	0,34	0,47
3	266	504,48	469,3	10,41	101,49	931,07	33,66	0,33	-0,48
4	201	495,66	463,2	12,06	101,49	931,07	34,49	0,32	-0,38
5	162	489,67	462,8	11,71	106,91	931,07	33,91	0,44	-0,26
6	136	499,87	462,9	13,11	106,91	931,07	33,37	0,43	-0,25
7	118	490,88	462,2	14,24	106,91	931,07	33,84	0,45	-0,13
8	103	485,01	455,6	15,62	106,91	918,29	33,76	0,40	-0,16
9	91	482,96	454,0	16,99	158,23	918,29	33,54	0,46	-0,31
10	82	495,53	459,2	17,49	162,14	918,29	31,96	0,48	-0,33
11	75	496,62	464,7	18,80	162,14	918,29	32,78	0,44	-0,44
12	69	498,40	464,7	19,84	162,14	918,29	33,04	0,46	-0,44
13	64	499,11	465,8	20,30	162,14	918,29	32,54	0,48	-0,43
14	59	500,05	467,0	22,77	162,14	918,29	33,43	0,46	-0,54
15	55	493,75	464,7	22,35	162,14	918,29	33,54	0,50	-0,44

EP=erro padrão da média; CV= coeficiente de variação (%); Min = mínimo; Max = máximo; assi= coeficiente de assimetria; curt=curtose

O modelo que apresentou melhor ajuste a estrutura da variabilidade espacial dos dados foi o modelo esférico (Tabela 3), onde os variogramas cruzados e parâmetros dos modelos para cada proporção amostral avaliada. As estimativas de alcance para as proporções amostrais de 2,6ha até a 15 ha variaram entre 2210,89 a 2653,47m. Considerando o grau de dependência espacial encontrado na proporção amostral 2,6ha, para a SM (18,01%) e para Pads (18,75%) (Tabela 3) ambos os atributos apresentaram uma dependência espacial forte segundo critério descrito por Cambardella et al., (1994), o qual estabeleceu o valor de até 25% para a relação  $C_0/C_0+C_1$  para considerar uma dependência espacial forte.

Os valores de alcance obtidos por meio do ajuste do variograma cruzado da SM com P<sub>ads</sub>, foram próximos o que indica um padrão de semelhança para essas variáveis (Tabela 3). Siqueira et al., (2010) também encontraram valores semelhantes de alcance de variogramas dos atributos físicos e químicos de Latossolos e da SM. Barbieri et al. (2013) também obtiveram correlação espacial positiva entre do P<sub>ads</sub> em Latossolo Vermelho eutroférico, sob cultivo de cana-de-açúcar. Valladares et al. (2003) apontam que a correlação entre esses atributos está relacionada à predominância de óxidos de ferro e alumínio, além de caulinita, na fração argila desses solos. Camargo et al. (2016) encontrou correlação alta entre a SM e P<sub>ads</sub>. Estes autores relatam que a alta correlação é associada com a relação entre o P<sub>ads</sub> e óxidos de ferro.

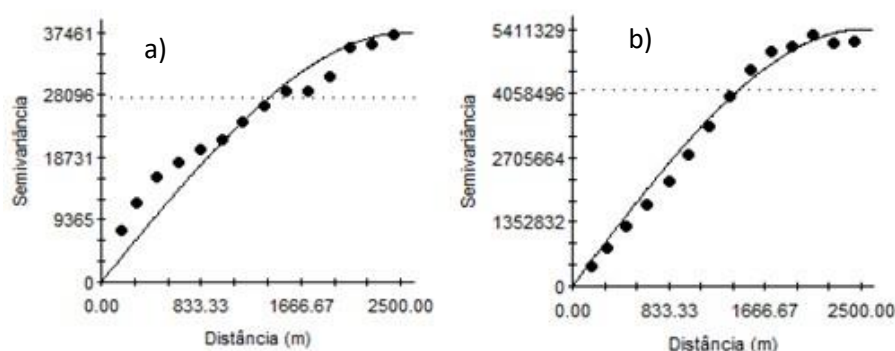
**Tabela 3.** Modelo e estimativa dos parâmetros dos variogramas para fósforo adsorvido (P<sub>ads</sub>) e suscetibilidade magnética (SM) e das densidades amostrais.

<u>Var</u>	<u>DA</u>	<u>Mod</u>	<u>C<sub>0</sub></u>	<u>C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub></u>	<u>GDE</u>	<u>a (m)</u>	<u>SQR</u>	<u>r<sup>2</sup></u>
P <sub>ads</sub>		Esférico	5715,50	30475,00	18,75	2081,68	1,49E+07	0,97
SM	-	Esférico	646603,22	3588832,62	18,01	1891,78	3,71+11	0,98
	2,6		0,00	47,00		2499,69	130	0,98
	3		0,00	48,05		2493,36	187	0,97
	4		0,00	47,66		2460,70	139	0,97
	5		0,00	42,18		2375,35	214	0,96
	6		0,00	44,53		2409,60	325	0,95
	7		0,00	44,93		2561,44	180	0,97
P <sub>ads</sub>			0,00	42,37		2409,60	209	0,96
X			0,00	44,29		2653,47	209	0,95
SM			0,00	37,22		2409,60	510	0,96
	11		0,00	46,52		2335,18	551	0,95
	12		0,00	49,35		2602,40	440	0,95
	13		0,00	43,61		2527,70	375	0,95
	14		0,00	44,90		2571,58	420	0,93
	15		0,00	40,91		2210,89	406	0,93

DA = densidade amostral, C<sub>0</sub>= efeito pepita; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub>= patamar; GDE= grau de dependência espacial; a = alcance; SQR = soma dos quadrados dos resíduos.

Foram ajustados ao modelo esférico os variogramas simples da SM e Pads para a proporção amostral 2,6ha (Figura 2), o mesmo reflete uma pequena variação na pequena escala da variável estudada, corroborando os resultados de (CAMARGO et al. 2014; PELUCO et al.2015). Marques Junior et al. (2014) também verificaram ajustes dos variogramas de SM ao modelo esférico. De acordo com Burgess & Webster (1980), o modelo esférico é associado à representação da continuidade espacial de atributos com características de transição abrupta, que identificados no campo facilmente.

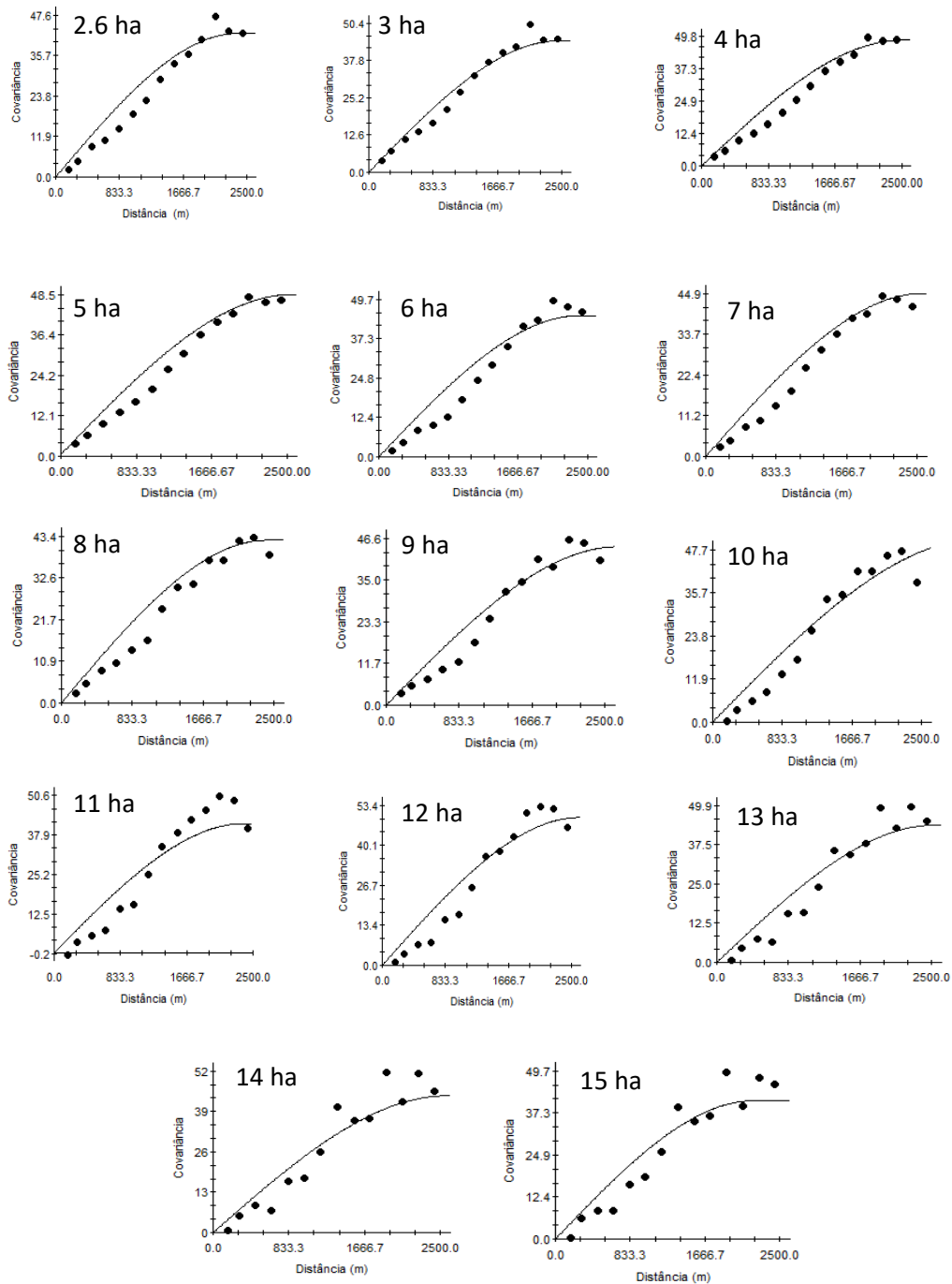
O alcance é de extrema relevância para a interpretação de variogramas, porque indica a distância máxima em que os pontos amostrais estão autocorrelacionados (WANG et al., 2015), podendo ser utilizado como indicador de homogeneidade ou como informação que auxilia no planejamento amostral (MONTANARI et al., 2012). O comportamento espacial das variáveis estudadas pode ser observado pelo alcance encontrado nos variogramas ajustados, com valor de 1891m para a SM e 2081 m para o Pads (Figura 2). De acordo com a continuidade espacial é verificada pelo alcance, sendo assim quanto maior o valor do alcance, maior é a continuidade espacial existente dos dados.



**Figura 3 .** Variograma experimental do Fósforo adsorvido- $P_{ads}$ (a) e suscetibilidade magnética-SM (b).



Para averiguar a distribuição e a correlação espacial foram construídos variogramas cruzados apresentados na Figura 3. Os variogramas cruzados foram estimados nos locais onde ambas as variáveis (SM e Pads) foram amostradas simultaneamente (DEUTSCH; JOURNAL, 1998). O variograma cruzado da SM e do Pads apresenta o modelo esférico e os padrões encontrados para as variáveis estudadas são apresentados na Figura 3. Para (TRANGMAR et al., 1987; SOUZA et al., 1998; SOUZA; VIEIRA; COGO, 1997; SALVIANO et al., 1998), McBratney e Webster (1986), o variograma que proporciona melhor ajuste para os atributos do solo é o modelo esférico.

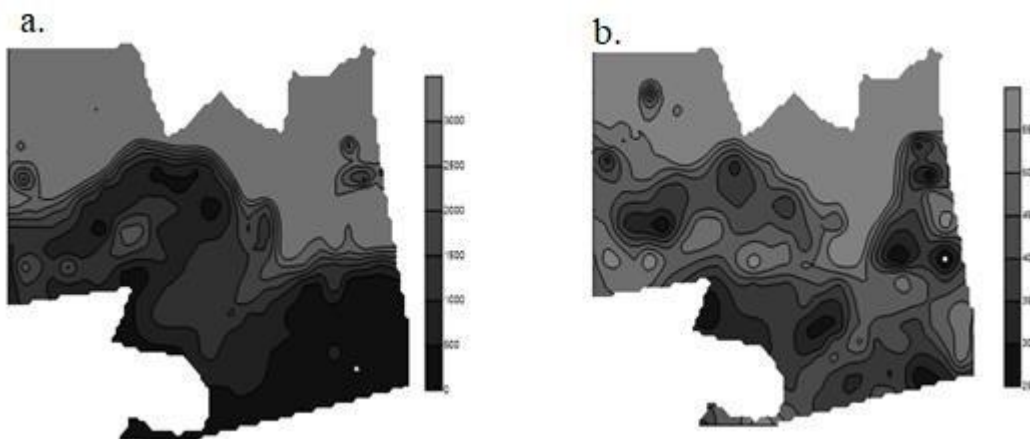


**Figura 4** Variograma experimental cruzado da SM e  $P_{ads}$ , modelo esférico nas proporções amostrais avaliadas.

Para verificar a variabilidade do  $P_{ads}$  e SM e a existência de correlação espacial, foram construídos mapas para a proporção amostral 2.6ha de amostragem

(Figura 4). A partir destes percebe-se que houve similaridade entre os mapas da SM e do Pads. As isolinhas do mapa de SM são semelhantes às do Pads uma vez que ao aumentar os teores de SM ocorre elevação do teor de Pads, corroborando os resultados obtidos por Siqueira et al. (2010a), que encontraram correlações positivas da SM com esse atributo.

Fazendo-se a análise dos mapas gerados a partir da interpolação por cokrigagem, vê-se que o Pads mostrou maiores valores na parte superior do mapa, que também foi acompanhado por maiores valores de SM. Peluco et al., (2015) estudando o mapeamento do Pads por meio da SM e índice de avermelhamento do solo, concluiu que a SM se correlaciona positivamente com o Pads, e a SM apresenta dependência espacial com o Pads, além de ter potencial para ajudar no mapeamento de áreas com diferentes potenciais de adsorção de fósforo.

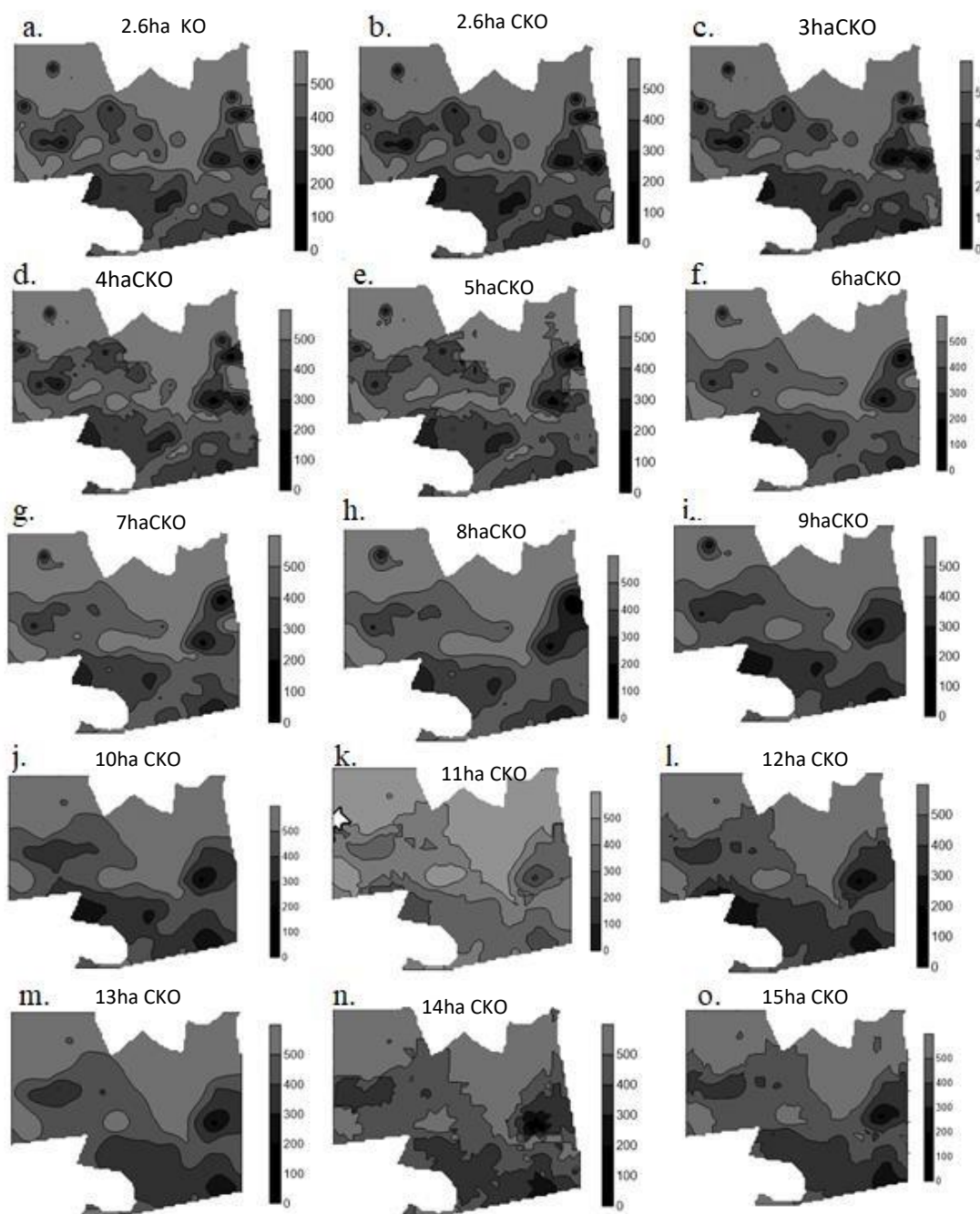


**Figura 5** Mapas de padrão espacial da suscetibilidade magnética  $10^{-8}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$  (a) e Fósforo adsorvido  $\text{mg dm}^3$  (b) na proporção amostral 2.6ha

Os mapas de padrão espacial foram obtidos a partir dos variogramas cruzados estimados para as proporções amostrais avaliadas (Figura 5). O que pode ser

confirmado pelo sentido das isolinhas observadas nas classes dessa variabilidade existente (LEÃO et al., 2011). Siqueira et al.(2010b) relatam que o relevo tem forte influência na variabilidade espacial dos atributos do solo. Levando em consideração que é na fração argila que são encontrados os principais minerais responsáveis pela adsorção de P, a SM pode ser utilizada no mapeamento de áreas de maior propensão à adsorção deste elemento. É possível dizer que existe uma similaridade de padrão de variabilidade entre os mapas de interpolação da CKO do  $P_{ads}$  em todas as proporções amostrais estudadas.

A partir da proporção amostral 11 ha se observa que o mapa da CKO não mantém as características apresentadas pelos mapas produzidos com maior proporção amostral. A partir da proporção amostral 12 ha, volta a apresentar mais similaridade aos mapas obtidos com maior densidade amostral voltando a apresentar mais qualidade na proporção amostral 13 ha, com os detalhes mais coerentes, mas retorna a apresentar perdas muito fortes na 14 e 15ha. Em estudo realizado com o objetivo de investigar a proporção amostral mais adequada para caracterização dos atributos de um Latossolo em diferentes materiais, utilizando a SM Siqueira et al., (2014) notou em seus mapas feito pela mesma técnica que mudanças consideráveis no padrão de distribuição foi observado.



**Figura 6** Mapas de Krigagem do  $P_{ads}$  na densidade amostral 2.6 ha e mapas de Cokrigagem do  $P_{ads}$  nas proporções amostrais estudadas

A avaliação quantitativa mostrada pelos baixos valores de IMR (índice de melhoria relativa) encontrados revelam pouco ganho de acurácia dos mapas gerados por esta técnica (Tabela 4). É possível notar que da proporção amostral 2,6ha até a

5ha há melhoria em termos de acurácia, no entanto a partir da proporção amostral de 6ha o comportamento fica errático. Os resultados indicam que a estimativa do  $P_{ads}$  usando a CKO, a partir de certa distância estabelecida (ha), as estimativas são menos confiáveis. Esse efeito pode ser atribuído a baixa densidade amostral.

Conforme pode ser notado na Tabela 4 a CKO proporcionou melhoria em termos de acurácia para as proporções amostrais 2,6ha 3ha, 4ha e 5 ha . A partir da proporção amostral 6 ha o comportamento contrário é observado, assumindo valor de 103,19. A CKO proporcionou ainda diminuição no valor de acurácia para as proporções amostrais 7, 8 e 9 ha, seguindo respectivamente com os valores de 110,30;121,29 e 115,75. A partir disso notou-se que a CKO volta a proporcionar melhorias para as proporções amostrais 10, 11, 12, 13, 14 e 15 ha.

**Tabela 4.** índices de acurácia (RMSE) e de melhoria relativa (IMR) calculados a partir da validação externa para avaliação dos mapas de cokrigagem do  $P_{ads}$

Proporção amostral (ha)	KO	CKO	IMR
2.6	80,50	80,03	0,58
3	82,91	81,91	1,21
4	84,25	82,31	2,31
5	88,58	86,72	2,10
6	103,19	103,19	0,00
7	102,85	110,30	-7,24
8	119,71	121,29	-1,32
9	111,06	115,75	-4,22
10	106,37	92,95	12,61
11	109,66	96,53	11,98
12	113,91	94,61	16,94
13	111,42	106,26	4,63
14	111,94	104,18	6,93
15	112,20	104,27	7,07

IMR =índice de melhoria relativa (%); KO = Krigagem ordinária e CKO= Cokrigagem

Embora existam várias pesquisas sobre diferentes proporções de amostragem (LIU et al., 2013; NANNI et al., 2011), estudos sobre a a proporção de amostragem ideal para uma geologia específica são escassos (LIU et al., 2013

Diante do que foi exposto, e corroborando resultados de Oliveira et. al (2015), é possível afirmar que o uso da SM permite o reconhecimento de área com baixo e alto teor de adsorção de P, sendo útil no planejamento agrícola, para aplicação de doses de P, de forma sustentável, amenizando custos e problemas ambientais.

## **5 CONCLUSÕES**

O fósforo adsorvido apresenta dependência espacial com a suscetibilidade magnética, indicando seu uso no auxílio do mapeamento e na identificação de áreas com diferentes potenciais de adsorção de fósforo.

A interpolação com co-krigagem utilizando a suscetibilidade magnética como covariável no mapeamento da variabilidade espacial do Fósforo adsorvido funciona até a proporção amostral 6 hectare, ou seja, um ponto a cada 6 hectare de fósforo adsorvido pode-se utilizar até 5 pontos de suscetibilidade magnética.

## 6 REFERÊNCIAS

Bahia ASRS, Marques Júnior J, Siqueira DS (2015b) Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo, Brazil. **Geoderma regional** 5:150-156.

Barbieri DM, Marques Júnior J, Pereira GT, La Scala JR N, Siqueira DS, Panosso AR (2013) Comportamento dos Óxidos de Ferro da Fração argila e do fósforo adsorvido, em diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 37: 1557–1568.

Barreto AC, Fernandes MF (2002) Produtividade e absorção de fósforo por plantas de milho em função de doses e modos de aplicação de adubo fosfatado em solo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 26:151156.

Brasil EC, Nascimento EVS (2010) Influence of limestone and phosphorus in development and production of varieties of yellow passion fruit. **Revista Brasileira de Fruticultura** 32: 892-902.

Brennan RF, Bolland MDA, Jeffery RC & Allen DG (1994) Phosphorus adsorption by a range of western Australian soils related to soil properties. **Communications in Soil Science Plant & Analysis** 25: 2785-2795.

Broggi F, Oliveira AC, Freire FJ, Freire MBGS, Nascimento CWA (2010) Adsorption and chemical extraction of phosphorus as a function of soil incubation time. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 14: 32-38.

Burgess TM, Webster R (1980) Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging. **Soil Science Society of America Journal** 31:315-331.



Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT & Alleoni LRF (2013) Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena** 100:100-106.

Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT, Bahia ASRS (2014) Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. **Scientia Agricola** 3(71): 244-256.

Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira G, Alleoni LRF, Bahia ASRS, Teixeira DB (2016) Pedotransfer functions to assess adsorbed phosphate using iron oxide content and magnetic susceptibility in an Oxisol. **Soil Use and Management** 32(2):172–82.

Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, PARKIN, T.B.; Karlen DL, Turco RF, Konopka, AE (1994) Fieldscale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal** 58:1501-1511.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (2017). Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, quarto levantamento, 2015. Brasília: **CONAB**, 16.

De Leão MGA, Marques Júnior JR, De Souza ZM, Siqueira DS, Pereira GT (2011) Terrain forms and spatial variability of soil properties in an area cultivated with citrus. **Engenharia Agrícola** 31:643-651.

Dearing JA, Hay KL, Baban SMJ, Huddleston AS, Wellington EMH, Loveland PJ (1996) Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International** 127:728–34.

Deutsch CV & Journel AG (1998) GSLIB. Geostatistical Software Library and User's Guide, 2nd ed. Oxford, New York: Oxford University Press.

Fink JR, Inda VA, Tiecher T, Barrón V (2016) Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia** 40: 369-379.

Fontes MPF & Weed SB (1996) Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: Relationships with specific surface area and mineralogy. **Geoderma** 72:37-51.

Frossard E, Achat DL, Bernasconi SM, Bünemann EK, Fardeau JC, Jansa J (2011) The use of tracers to investigate phosphate cycling in soil–plant systems. In: Bünemann, EK, editors, Phosphorus in action. **Springer-Verlag** 59–91.

Gamma Design Software. 2008. GS+ Geostatistics for the Environmental Sciences, Version 9.0. Gamma Design Software, Plainwell, MI, USA.

Garcia RA, Merlin A, Toledo MZ, Fernandes, D. M.; Crusciol, C. A. C.; Büll, L. T. Desenvolvimento da aveia branca e disponibilidade de fósforo em razão da aplicação de silicato de potássio. *Revista Ceres*, v.58, p.831-837, 2011.

Gomes RP, Campos MCC, Rodrigues MD, Pinheiro DM, Cunha JM, Franciscon U, Silva LS, Oliveira IA, Brito WBM (2017) Spatial Variability of Aggregates and Organic Carbon Under Three Different Uses of Indian Black Earth in Southern Amazonas. **Bioscience Journal** 33: 1513-1522.

Golden Software. 2009. Surfer for Windows: Surface Mapping System; Version 9.11.947. Golden Software, New York, NY, USA.

Grant CA, Flaten DN, Tomaszewicz DJ, Sheppard SCA (2011) Importância do fósforo no desenvolvimento da planta. **Informações agronômicas** 95:1.

Hunt JF, Ohno T, He Z, Honeycutt CW, Dail DB (2007) Inhibition of phosphorus sorption to goethite, gibbsite, and kaolin by fresh and decomposed organic matter. **Biology and Fertility of Soils** 44:277–288.

Isaaks, EH & Srivastava, RM (1989) An introduction to applied geostatistics. New York, **Oxford University Press** 561p.

Journel AG, Huijbregts CJ Mining geostatistics. London: **Academic Press**, (1991) 600p.

Ker JC, Fontes MPF, Souza AR, Resende M (1996) Adsorção de fósforo em alguns solos latossólicos: relação entre mineralogia e efeito da calagem. **Revista Ceres** 43:216-226.

Korndörfer GH, De Melo SP (2009) Fontes de fósforo (fluida ou sólida) na produtividade agrícola e industrial da cana-de-açúcar Effects of phosphorus sources (liquid or solid) on agricultural and industrial sugarcane yield. **Ciência e Agrotecnologia** 33: 92-97.

Kuo S. & Lotse EG (1974) Kinetics of phosphate adsorption and desorption by lake sediments. **Soil Science Society of America Journal** 38:50-54.

Kruse J, Abraham M, Amelung W, Baum C, Bol R, Kühn O, Lewandowski H, Niederberger J, Oelmann Y, Rieger C, Santner J, Siebers M, Siebers N, Spohn M, Vestergren J, Vogts A, Leinweber P (2015) Innovative methods in soil phosphorus research: a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 1:43-88.

Li J, Heap A (2008) A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists. **Geoscience Australia** 137:23

Marques Júnior JR, Souza ZM, Pereira, Gener T, Barbieri DM (2008) Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um latossolo cultivado. **Revista de Biologia e Ciências da Terra** 8: 143-152.

Marques Júnior JR, Siqueira DS, Camargo LA, Teixeira DDB, Barrón V, Torrent J (2014) Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma** 219-220:63-71.

Mathé V, Lévêque F, Mathé PE, Chevallier C, Pons Y (2006) Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: Limits in the low magnetic amplitude case. **Journal of Applied Geophysics** 58: 202–17.

Matheron G (1963) Principles of Geostatistics. **Economic Geology** 58: 1246-126  
Matias SSR, Marques Júnior JR, Pereira GT, Siqueira DS (2015) Ferramentas matemáticas, suscetibilidade magnética e modelos de paisagem aplicados na delimitação de áreas de manejo específico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39: 968-980.

Matias SSR, Marques Júnior JR, Siqueira DS, Pereira GT (2014) Outlining precision boundaries among areas with different variability standards using magnetic susceptibility and geomorphic surfaces. **Engenharia Agrícola**. 34: 695-706.

Matias SSR, Marques Júnior JR, Siqueira DS, Pereira GT (2013) Modelos de paisagem e susceptibilidade magnética na identificação e caracterização do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 43:93-103.

Mcbratney AB, Webster R (1983) Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: V. Coregionalization and multiple sampling strategy. **Journal of Soil Science** 34:137 – 162.

Mcbratney AB, Webster R (1986) Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science** 37: 617-639.

Mehadi AA, Taylor R W (1998) Phosphate adsorption by two highly-weathered Soils. **Soil Science Society America Journal** 52:627-632.

Montanari R, Souza GSA, Pereira GT, Marques Júnior J, Siqueira, DS, Siqueira GM (2012) The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture** 13: 01-11.

Moreira FLM, Mota FOB, Clemente CA, Azevedo BM, Bomfim GV (2006) Adsorção de fósforo em solos do Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica** 37:7-12.

Nakos G (1987) Phosphorus adsorption by forest Soils Commum. **Soil Science and Plant Analysis Journal** 18(3):279-286.

Nascimento GB, Anjos LHC, Pereira MG, Fontana A, Santos HG (2010) Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** (4) 5: 560-569.

Oliveira MW, Freire FM, Macêdo GA, Ferreira JJ (2007) nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. **Informe agropecuário, Belo Horizonte** 28: 3043.

Oliveira IA, Marques Junior J, Campos MC, Aquino RE, Freitas L, Siqueira DS, Cunha JM (2015) Variabilidade Espacial e Densidade Amostral da Suscetibilidade Magnética e dos Atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39: 668-681.

Oliveira IA, Freitas L, Aquino RE, Casagrande JC, Campos MCC, Silva LS (2018) Chemical and physical pedoindicators of soils with different textures: spatial variability. **Environmental Earth Sciences** 77: 81.

Parfitt RL, Atkinson RJ, Smart RSTC (1975) The mechanism of phosphate fixation by iron oxides. **Soil Science Science of America Proceedings** 39:837841.

Peluco RG, Marques Júnior JR, Siqueira DS, Barbosa RS, Teixeira DDB, Cortez LA (2013) Suscetibilidade magnética do solo e estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 48: 661672.

Peluco RG, Marques Júnior JR, Siqueira DS, Cortez LA (2013) Magnetic susceptibility in the prediction of soil attributes in two sugarcane harvesting management systems. **Engenharia Agrícola**. 33: 1134-1143.

Peluco RG, Marques Júnior JR, Siqueira DS, Pereira GT, Barbosa RS, Teixeira DDB (2015) Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília 50: 259-266.

R Development Core Team. R Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2010.

Rolim Neto FC, Schaefer CEGR, Costa LM, Corrêa MM, Fernandes Filho EI, Ibraimo MM (2004) Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto ParanaíbaMG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28:953-964.

Salviano AAC, Vieira SR, Sparovek G (1998) Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* (L.) em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 22:115-122.

Santos HL, Marques Júnior JR, Matias SSR, Siqueira DS, Pereira GT (2011) Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em uma vertente. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** 6:710-6.

Silva LS, Galindo ICL, Nascimento CWA, Gomes RP, Campos MCC, Freitas L, Oliveira IA (2016) Heavy metal contents in Latosols cultivated with vegetable crops. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 46: 391-400.

Simões Neto DE, De Oliveira AC, Freire FJ, Freire MBG, Do Nascimento CWA, Da Rocha AT (2009) Extração de fósforo em solos cultivados com cana-deaçúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 13:840-848.

Simpson RJ, Oberson A, Culvenor RA, Ryan MH, Veneklaas EJ, Lambers H, Lynch JP, Ryan PR, Delhaize E, Smith FA, Smith SE, Harvey PR, Richardson AE (2011) Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus use efficiency of farming systems. **Plant and Soil** 349: 89–120.

Siqueira DS, Marques Júnior JR, Matias SSR, Barrón V, Torrent J, Baffa O, Oliveira LC (2010) Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management** 26: 425-431.

Siqueira DS, Marques Júnior JR, Pereira GT (2010) The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma** 155: 55-66.

Siqueira DS, MARQUES Júnior J, Pereira GT, Barbosa RS, Teixeira DB, Peluco RG (2014) Sampling density and proportion for the characterization of the variability of Oxisol attributes on different materials. **Geoderma** (Amsterdam)232234:172-182.

Siqueira DS, Marques Júnior JR, Teixeira DDB, Matias SSR, Camargo LA, Pereira GT (2016) Magnetic susceptibility for characterizing areas with different potentials for sugarcane production. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51:1349-1358.

Souza LS, Cogo NP, Vieira SR (1997) Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 21:367-372.

Soares A (2006) Geoestatística para ciências da terra e do ambiente. 2.ed. Lisboa: **Instituto Superior Técnico** 214.

Souza LS, Cogo NP, Vieira SR (1998) Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo, em relação a sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 22:77-86.



Souza JR, IG, Costa ACS, Vilar CC, Hoepers A (2010) Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Ciência Rural** 40:513-9.

Sousa SFG, Marasca I, Paludo V, Silva PRA, Lanças KP (2015) Produtividade da cultura de cana de açúcar com e sem a aplicação de fósforo em profundidade utilizando equipamento de preparo profundo mecanizado. **Energia na agricultura** 30:276-279.

Teixeira DDB, Bicalho ES, Panosso AR, Perillo LI, Iamaguti JL, Pereira GT, La Scala N (2012) Uncertainties in the prediction of spatial variability of soil CO<sub>2</sub> emissions and related properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36: 1466-1475.

Tiecher T, Dos Santos DR, Kaminski J, Calegari A (2012) Forms of inorganic phosphorus in soil under different long-term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36:271-281.

Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review** 38:1-32.

Torrent J, Barron V, Liu QS (2010) Magnetic susceptibility changes in relation to pedogenesis in a Xeralf chronosequence in northwestern Spain. **European Journal of Soil Science** 61:161-73.

Trangmar BB, Yost RS, Uehara G (1985) Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy** 38, p.45-94.

Trangmar BB, Yost RS, Wade MK, Uehara G, Sudjatl M (1987) Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land. **Soil Science Society of America Journal** 51:668-674.

Vauclin M, Vieira SR, Vauchaud G, Nielsen DR (1983) The use of cokringing with limited field soil observation. **Soil Science Society of America Journal** 47:175-184.

Valladares GS, Pereira MG, Anjos LHC (2003) Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia** 62:111-118.

Veith JA & Sposito G (1977) On the use of the Langmuir equation in the interpretation of adsorption phenomena. **Soil Science Society of America Journal** 41: 697-702.

Vieira SR, Nielsen DR, Biggar JW (1981) Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal** 45:1040-1048.

Vieira SR (2000) Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R.F.; Alvarez, V.V.H.; Schaefer, C.E.G. eds. **Tópicos em ciência do solo** 1:1-53.

Wang J, Yang R, Bai Z (2015) Spatial variability and sampling optimization of soil organic carbon and total nitrogen for Mineseils of the Loess Plateau using geostatistics. **Ecological Engineering** 82: 159-164.

Warrick AW & Nielsen DR (1980) Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, **Academic Press** 350.