

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

RELAÇÕES ENTRE ASSINATURA MAGNÉTICA DO SOLO E
RECOMENDAÇÕES DE CALAGEM, GESSAGEM E
FOSFATAGEM CORRETIVA PARA CANA-DE-AÇÚCAR

Frederico Luiz Siansi
Engenheiro Agrônomo

2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

RELAÇÕES ENTRE ASSINATURA MAGNÉTICA DO SOLO E
RECOMENDAÇÕES DE CALAGEM, GESSAGEM E
FOSFATAGEM CORRETIVA PARA CANA-DE-AÇÚCAR

Frederico Luiz Siansi

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Diego Silva Siqueira

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 (Ciência do Solo).

Siansi, Frederico Luiz

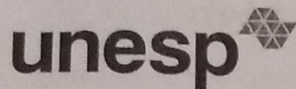
S562r Relações entre assinatura magnética do solo e recomendações de
calagem, gessagem e fosfatagem corretiva para cana-de-açúcar /
Frederico Luiz Siansi. – – Jaboticabal, 2019
100 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: José Marques Júnior

Coorientador: Diego Silva Siqueira

1. Pedometria. 2. Geoestatística. 3. Mapeamento detalhado. 4.
Manejo da cana-de-açúcar. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

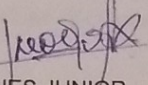
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: RELAÇÕES ENTRE ASSINATURA MAGNÉTICA DO SOLO E
RECOMENDAÇÕES DE CALAGEM, GESSAGEM E FOSFATAGEM
CORRETIVA PARA CANA-DE-AÇÚCAR

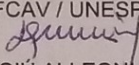
AUTOR: FREDERICO LUIZ SIANSI

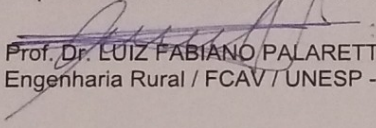
ORIENTADOR: JOSÉ MARQUES JUNIOR

COORIENTADOR: DIEGO SILVA SIQUEIRA

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


Prof. Dr. JOSÉ MARQUES JUNIOR
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. LUÍS REYNALDO FERRACCIÚ ALLEONI
Departamento de Ciência do Solo / USP - Piracicaba, SP


Prof. Dr. LUIZ FABIANO PALARETTI
Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 01 de agosto de 2019

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

FREDERICO LUIZ SIANSI – nascido em 24 de junho de 1987, em Ribeirão Preto – SP, graduado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – FCAV/UNESP Jaboticabal (2016). Foi bolsista de iniciação científica de 2011 a 2013 e de 2015 a 2016 pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e bolsista CAPES e CNPq, amparado ao programa Ciência sem Fronteiras, como aluno de graduação sanduíche nos EUA entre 2014 e 2015. Iniciou o mestrado no programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pela FCAV/UNESP, em março de 2017. Atua na área de Engenharia Agrônômica, com ênfase em Agricultura de Precisão e Mineralogia do Solo, trabalhando principalmente com mapeamento de áreas de manejo específico, relação solo-paisagem, geoestatística, lógica fuzzy, e técnicas pedométricas (susceptibilidade magnética do solo e espectroscopia de reflectância difusa). Membro ativo do grupo de pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP Câmpus de Jaboticabal, desde 2010, participou de publicações e organizações, entre os quais menção honrosa pelo segundo melhor trabalho na área de Ciências Agrárias, no XXV Congresso de Iniciação Científica e I Fórum Internacional de Iniciação Científica da Unesp. Atua também no setor privado como Trainee da área da Qualidade Agrícola da Usina São Martinho S/A, Pradópolis - SP. Diante desta função na Usina, participa de atividades no planejamento e controle de Pragas, Experimentação Agrônômica, Amostragem e Mapeamento de Solos, Auditorias Agrícolas, Geoprocessamento e Modelagem de Sistemas Agrícolas. Realiza também capacitações profissionalizantes em encontros anuais de formação de líderes e encontros mensais de sensibilização comportamental com foco na melhoria contínua.

O analfabeto do século XXI não será
aquele que não consegue ler e escrever,
mas aquele que não consegue aprender,
desaprender e reaprender (Alvin Toffer).

Sem dados você é uma pessoa qualquer com uma opinião.
(William Edward Deming)

Ao meu Pai, Sebastião Luiz Siansi, e minha mãe, Magda
Regina Lellis Siansi (*in memoriam*)

DEDICO

À minha família

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida. Em tudo que faço, que sou e que aspiro buscar, tudo posso naquele que me fortalece.

Ao meu pai Sebastião Luís Siansi, pelo exemplo de honestidade, simplicidade e lutador, que faz reerguer meu bom estado de espírito para o meu dia a dia. À minha mãe Magda Regina Lellis Siansi (*in memoriam*), que apesar de ter partido mais cedo, deixou os filhos impregnados do amor materno, cientes da caminhada como alunos, na busca pelo conhecimento, paixão e respeito à vida.

Aos meus irmãos, Felipe Augusto Siansi e Fabrício Gabriel Siansi, que sabem que nossas batalhas não são ganhas sozinhas, mas é devido ao amor que nos une, às diferenças que nos desenvolvem e à força de trabalho que nos complementam. Eu tenho o privilégio de ser abençoado por uma família que me apoia e que faz todo sentido para mim.

Ao meu orientador Professor Doutor José Marques Júnior e ao coorientador Professor Doutor Diego Silva Siqueira, pelos ciclos concluídos nestes últimos 10 anos. São deles que me faz sentir como a caminhada através do lápis é interminável, mas muito gratificante. A confiança e a parceria com estes profissionais ao longo destes anos fazem de mim um profissional melhor e deixam-me aberto ao espírito crítico diante das inovações e aperfeiçoamentos do setor acadêmico e privado.

Aos especialistas membros da Banca de Qualificação, Professores Doutores da Unesp/Jaboticabal, Marcílio Vieira Martins Filho e Alan Rodrigo Panosso, pelas valiosas sugestões e contribuições científicas a este trabalho.

Ao Professor Doutor Rafael Otto da Usp/Esalq, Professor Doutor Daniel de Bortoli Teixeira, da Unimar/Marília, e ao pesquisador Carlos Cesar Ronquim, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa/ Campinas), pela atenção atribuída a este trabalho que fez melhorar a linha de raciocínio desta dissertação.

À Usina São Martinho, pela concessão da área de estudos e apoio às atividades que conduzem esta dissertação. O convívio no trabalho com os colaboradores da Usina são a chave para o sucesso dos projetos que estou à parte. Em nome do diretor de

inovação Mário Ortiz Gandini, gerente agrícola Luís Gustavo Teixeira, coordenador agrícola Marcos Antônio Marcari, a amizade e a parceria dos colaboradores Rafael Gonçalves Peluco, Ana Beatriz Coelho França e Michelle Gimenes Catelan, eu agradeço em nome de todos os envolvidos. Isto me faz lembrar o pensamento que, quando trabalhamos em grupo, podemos chegar mais longe do que quando andamos sozinhos e isolados. Eu optei por andar em grupo e sou grato pela escolha certa.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal (FCAVJ)/ Unesp, e a todos os integrantes e ex-integrantes do grupo de pesquisa Caracterização do Solo para fins de manejo específico (CSME), com os quais convivi nestes últimos anos. Meu agradecimento especial à Doutora Angélica Santos Rabelo de Souza Bahia, Doutoranda Kathleen Lourenço Fernandes, Doutora Lívia Arantes Camargo, e doutorandos Romário Pimenta Goes e Laércio Silva Santos, pela ajuda nas análises em laboratório neste trabalho.

Agradeço as revisões gramaticais do Professor, escritor e crítico literário Luiz Puntel, e da experiência do Professor Vítório Barato Neto, a melhorar o entendimento dos parágrafos em contextos de coerência e coesão, e na revisão da escrita de acordo com as novas ortografias da língua portuguesa.

A todos os meus amigos, fora e dentro da Universidade e da Usina São Martinho, que fazem parte de minhas pequenas conquistas, de minhas dificuldades, de minhas superações, eu agradeço.

SUMÁRIO

	Página
CAPÍTULO 1. Considerações gerais.....	1
1.1 Introdução	1
1.2 Revisão de literatura	5
1.2.1 Calagem para correção da acidez superficial do solo	5
1.2.2 Gessagem para cana-de-açúcar	9
1.2.3 Fosfatagem corretiva e sua importância na agricultura	13
1.2.4 Assinatura magnética e suas aplicações	17
1.2.5 Análise Multivariada	19
1.2.6 Análises Geoestatísticas	21
1.2.6.1 Variograma.....	21
1.2.6.2 Semivariograma cruzado.....	25
1.2.6.3 Krigagem	26
1.3 Referências.....	27
CAPÍTULO 2. Assinatura magnética e estimação da calagem, gessagem e fosfatagem corretiva do solo	51
2.1 Introdução	51
2.2 Material e Métodos.....	55
2.3 Resultados e Discussão.....	61
2.4 Conclusões	77
2.5 Referências.....	78
CAPÍTULO 3. Considerações finais	87

RELAÇÕES ENTRE ASSINATURA MAGNÉTICA DO SOLO E RECOMENDAÇÕES DE CALAGEM, GESSAGEM E FOSFATAGEM CORRETIVA PARA CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO – O sucesso da produtividade da cana-de-açúcar requer adequadas recomendações para a correção e adubação do solo. A acidez do solo deixa indisponíveis inúmeros nutrientes essenciais à planta, enquanto a adubação inadequada retarda a longevidade do canavial. Desse modo, objetivou-se, neste estudo, verificar o potencial da suscetibilidade magnética do solo para auxiliar nas recomendações e no mapeamento de áreas específicas de manejo para as aplicações de calagem, gessagem e fosfatagem corretiva do solo. Foram coletadas 89 amostras de solo em uma área de 443 hectares, nas quais foram determinados os atributos químicos, os teores de argila e a suscetibilidade magnética do solo. Foram calculadas as recomendações de calagem, gessagem e fosfatagem para cada amostra. Os dados foram submetidos à análise estatística e aos componentes principais. Foram desenvolvidas, nos pontos estratificados, funções de pedotransferência utilizando modelos de regressão entre a suscetibilidade magnética do solo e os atributos estudados. A modelagem da dependência espacial foi feita com o uso da geoestatística e construídos os mapas de krigagem e variogramas cruzados para observar a correlação espacial entre a suscetibilidade magnética do solo e os atributos estudados. A suscetibilidade magnética do solo acompanhou, em mesmo sentido, o grupo discriminado pela fosfatagem e pela gessagem e apresentou correlação espacial linear negativa com a recomendação de calagem ($R = -0,84$), e positiva com gessagem ($R = 0,88$) e fosfatagem ($R = 0,93$). Desta forma, a suscetibilidade magnética teve potencial para auxiliar nas recomendações de calagem, gessagem e fosfatagem, bem como na elaboração de mapas de áreas específicas para o manejo destas práticas.

Palavras-chave: geoestatística, zonas de manejo específico, pedometria.

RELATIONSHIP BETWEEN MAGNETIC SUSCETIBILITY OF SOIL AND RECOMMENDATIONS FOR LIMING, GYPSUM AND CORRETIVE SOIL PHOSPHATING FOR SUGARCANE

SUMMARY - The success of sugarcane productivity requires adequate recommendations for soil correction and fertilization. The acidity of the soil leaves many essential plant nutrients unavailable, while undesirable fertilizer doses delays the longevity of the sugarcane field. Thus, the objective of this study was to verify the potential of the magnetic susceptibility of the soil to aid in the recommendations and mapping of specific management areas for liming, gypsum, and corrective soil phosphate applications. Eighty nine soil samples were collected in an area of 443 hectares, on which soil chemical properties, clay content, and magnetic susceptibility of the soil were determined. Recommendations for agricultural liming, gypsum, and corrective soil phosphating were calculated for each sample. Data were subject to descriptive statistical analysis, and main components. Pedotransfer functions were developed at the stratified points using regression models between the magnetic susceptibility of the soil and the attributes studied. The spatial dependence modeling was done with the use of Geostatistics, and the Kriging maps and cross variograms were constructed to observe the spatial correlation between the magnetic susceptibility of the soil and the attributes studied. The magnetic susceptibility of the soil followed in the same direction the group discriminated by the gypsum and corrective soil phosphating and presented negative linear spatial correlation with the liming recommendation ($R = -0,84$), and positive spatial correlation with the recommendation for agricultural gypsum ($R = 0,88$), and corrective phosphating ($R = 0,93$). Therefore, the magnetic susceptibility of the soil had the potential to help in the recommendations of liming, gypsum, and phosphating, as well as in the elaboration of maps of specific areas for the management of these practices.

Index terms: geostatistics, specific soil management, pedometrics.

Capítulo 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 Introdução

O Brasil é um país com liderança mundial em diversos produtos agropecuários, e ao longo de diversos ciclos e transformações, o setor canavieiro, pautado, principalmente, na produção de cana-de-açúcar, é um dos pilares da economia brasileira. O crescimento contínuo, aliado à expansão das fronteiras agrícolas sem danos ao ambiente e ao aumento da produtividade, demandou nos últimos anos maiores investimentos e aprimoramentos de novas tecnologias e estratégias de gerenciamento a serem adotadas no setor agrícola (Molin, 2002).

Atualmente, o setor sucroalcooleiro representa cerca de 2% do PIB nacional e 8% do PIB da agricultura no Brasil, sendo o maior produtor e exportador de açúcar e o segundo maior produtor de etanol do mundo. As produções de cana-de-açúcar concentram-se nas regiões Centro-Sul e Nordeste do Brasil, e o Estado de São Paulo detém mais de 60% de toda a produção nacional. Contudo, os desafios da produção de cana-de-açúcar vêm aumentando devido, entre outros fatores, às mudanças climáticas, ocorrências de novas doenças, pragas e plantas daninhas, e ao mau uso e/ou à falta de planejamento quanto à aplicação de fertilizantes e corretivos do solo.

Nos últimos 10 anos, a produção de fertilizantes no Brasil diminuiu em 17% (Anda, 2019). No País, poucas empresas controlam os preços do mercado de produção de fertilizantes, ao mesmo tempo a dependência externa faz com que o País importe 83% do nitrogênio, 95% do potássio, e 60% do fosfato. Em relatório apresentado do atual governo federal, a atenção quanto à exploração de reservas de potássio, cálcio e magnésio, e na criação de novas mineradoras, será uma prioridade nacional (Brasilagro, 2019).

O mau uso de fertilizantes e de corretivos agrícolas podem trazer consequências severas para o ambiente, o que inclui a perda de hábitat em algumas regiões do globo (Conley et al., 2009). Em vista disso, para aumentar as ferramentas de auxílio ao produtor, afim de definir as estratégias de manejo a serem adotadas, e com o intuito de aumentar a produtividade e diminuir os riscos ambientais, técnicas auxiliares para

recomendar com maior racionalidade dosagens de calcário, gesso e fosfatagem corretiva tornam-se mais pronunciadas entre as novas tecnologias para a agricultura.

As maiores limitações das produções agrícolas vêm do ineficiente desenvolvimento do sistema radicular da cultura. Em grande parte dos solos cultivados com cana-de-açúcar e nas áreas de expansão, sobretudo para áreas do cerrado, há predomínio de solos ácidos e elevadas saturações por alumínio trocável e baixos teores de cálcio. Processos de lixiviação, de extração de cátions básicos pelas plantas, assim como, do uso excessivo de fertilizantes de caráter ácido, como os adubos nitrogenados, ocasionam a acidificação progressiva dos solos (Raij, 1981).

A técnica da calagem visa a elevar o pH do solo para faixa de valores que permitem a disponibilidade da grande maioria de nutrientes essenciais às plantas. Solos de caráter ácido limitam a ação das culturas à absorção de água e de nutrientes. Neste intuito, o gesso agrícola, considerado um condicionador do solo, irá permitir melhorias dos atributos físicos e químicos do solo, corrigindo o efeito do alumínio tóxico, aumentando o teor de cálcio em subsuperfície e permitindo o aumento da produtividade das culturas devido, principalmente, ao desenvolvimento do sistema radicular em profundidade (Penatti et al., 1997).

Solos ácidos e com baixa fertilidade reduzem a produtividade agrícola (Souza et al., 2014). A adubação fosfatada corretiva (fosfatagem) eleva o teor do P nos solos e permite aumentar a eficiência da utilização de água pela planta, a absorção e a utilização de outros nutrientes oriundos do adubo ou solo, e contribuindo assim para aumentar a resistência da planta a algumas doenças, para suportar baixas temperaturas e falta de umidade do solo (Korndörfer, 2004).

É fundamental reduzir os custos ao longo da cadeia produtiva dada a atual competitividade da economia atual (Silva et al., 2006). Acrescenta-se a esta realidade econômica o apelo ambiental à conservação dos recursos naturais através de maior eficiência na manipulação da lavoura, como no caso da aplicação de insumos, e recomendações de adubação diante da necessidade de cada cultura. Com o intuito de fornecer mais recursos à gestão para conseguir o sucesso esperado, a agricultura de precisão é uma técnica cada vez mais empregada na ciência do solo a fim de detectar a

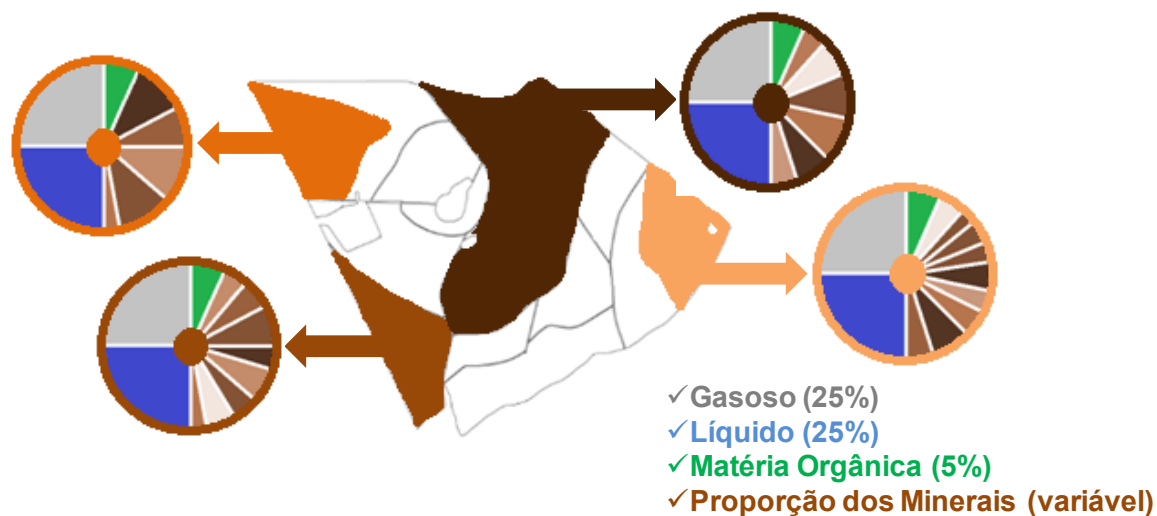
variabilidade dos atributos do solo para a aplicação correta de dosagens de adubos e insumos durante o processo produtivo (Silveira et al., 2000; Earl et al., 2003; Weirich Neto et al., 2006; Machado et al., 2007).

Com a agricultura de precisão focada no princípio de aplicar a quantidade certa, no local indicado e no período adequado irá fazer com que a tecnologia investida seja um retorno econômico viável a sua implantação (Dobermann e Ping, 2004). Nesse sentido, técnicas como a geoestatística são utilizadas na agricultura de precisão para o mapeamento de áreas de zonas de manejo específico e, desta forma, reconhecer áreas que receberão, por exemplo, doses diferentes para a correção do solo com a calagem.

O mapeamento das áreas que receberão maiores ou menores aplicações de calcário, gesso e fosfatagem corretiva terá melhor racionalidade das dosagens à partir do conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo. O conhecimento da variabilidade espacial e do número de amostragem é de fundamental importância na geoestatística. No entanto, os esforços em aumentar o número de amostragem dificulta o uso dessa ferramenta (Legros, 2006), fato que leva alguns autores a buscar técnicas alternativas, como a aplicação de funções de pedotransferência (Vieira et al., 1983; Mcbratney, 2003; Siqueira et al., 2010; Siqueira et al., 2015; Teixeira et al., 2018).

O contexto mineralógico muda bastante em locais com altos e baixos teores de ferro, e os ambientes magnéticos são suscetíveis a identificar estas variações que ocorrem em campo (Figura 1). As proporções entre os minerais regem a variabilidade espacial dos atributos do solo, e assim, fazem com que a necessidade de adubações e de insumos seja diferente entre as áreas homogêneas (Almeida et al., 2003; Fernandes et al., 2004 ; Becegato e Ferreira 2005).

O aumento da proporção de óxidos de ferro, tais como hematita, é acompanhado do aumento dos ambientes magnéticos (Marques Jr et al., 2014). Na Figura 1, por exemplo, houve uma variação de 12 vezes do menor para o maior ambiente magnético, enquanto que argila e hematita foi de 3 vezes, e gibssita foi de 10 vezes. Como a proporção dos minerais do solo está diretamente relacionada com as propriedades físicas e químicas do solo, os ambientes magnéticos podem auxiliar no conhecimento espacial do solo visto que acompanham as variações mineralógicas em solos tropicais.



Ambientes Magnéticos ($10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$)	%Argila	%Hm	%Gt
<3	<13	2 - 4	0,4
3 - 11	13 - 20	5 - 9	0,4
11 - 21	20 - 29	9	1
21 - 36	29 - 39	10	1,5
>36	>39	12	2 - 5

Figura 1. Relação entre os componentes do solo e os ambientes magnéticos para identificação de áreas homogêneas visando ao manejo específico. Fonte: Grupo de Pesquisa CSME (Caracterização do solo para fins de manejo específico)/ Unesp - Câmpus de Jaboticabal.

Entre os métodos não destrutivos para a caracterização dos atributos do solo, está a suscetibilidade magnética (Siqueira et al., 2010). Relacionada com a mineralogia dos óxidos de ferro das frações areia e argila, a resposta magnética dos sedimentos e dos solos está determinada, predominantemente, pelos minerais magnetita e/ou maghemita. Schachtschabel et al. (1998) afirmam que a SM é sensível às variações dos fatores e aos processos de formação do solo, e pode expressar as propriedades cristalográficas dos minerais presentes nos sedimentos e no solo.

A utilização da suscetibilidade magnética do solo (SM) é um atributo rápido de ser medido, e não usa reagentes químicos, logo, não impacta o ambiente, e é uma técnica de baixo custo, usada em diversas pesquisas, por muitos autores, em funções de pedotransferência (Grimley e Vepraskas, 2000; Torrent e Barrón, 2008). Essa

técnica poderia não apenas auxiliar nos estudos de variabilidade dos atributos do solo, como também identificar áreas mais sujeitas às recomendações de correção do solo com calagem, e aplicações de gessagem e fosfatagem corretiva do solo.

Vários autores buscaram estudar a suscetibilidade magnética do solo como ferramenta a tomadas de decisão. Ventura Jr et al. (2001) e Guzmán et al. (2010) utilizaram as medidas de suscetibilidade magnética do solo em marcadores constituídos por óxidos de ferro magnéticos sintéticos para avaliar a erosão de solos; Cortez et al. (2011) elaboraram mapas para fins de uso e manejo específico do solo; Camargo et al. (2013) em estudos de adsorção do fósforo; Teixeira (2016), em erodibilidade de latossolos; Bahia et al. (2017) nas quantificações físicas e químicas do solo. Todos estes trabalhos envolveram a suscetibilidade magnética do solo para auxiliar as investigações de planejamento no setor agrícola.

Nesse sentido, o objetivo neste trabalho foi utilizar a suscetibilidade magnética do solo para auxiliar nas recomendações e no mapeamento de áreas específicas de manejo para as aplicações de calagem, gessagem e fosfatagem corretiva do solo.

1.2 Revisão de Literatura

1.2.1 Calagem para a correção da acidez superficial do solo

Aproximadamente 70% do território brasileiro possuem solos ácidos e que podem causar redução de até 40% do potencial produtivo das culturas (Quaggio, 2000). Os solos brasileiros, principalmente no cerrado, apresentam características de acidez, altos teores de alumínio, excesso de manganês, baixos níveis de cálcio e magnésio, e alta fixação de fósforo nos coloides do solo (Quaggio 2000; Raij e Quaggio, 1997; Ernani et. al., 1998; Bohnen, 2000; Anghinoni e Salet, 2000). Entre as causas que aceleram a acidez dos solos destacam-se a água da chuva, dada a dissociação do ácido carbônico – H_2CO_3 ; a decomposição de materiais orgânicos, posto que pode ocorrer a dissociação de prótons de agrupamentos carboxílicos e fenólicos; a adição de

fertilizantes, sobretudo os nitrogenados, na forma de amônio (NH_4^+); e a lixiviação de cátions como cálcio, potássio e magnésio (Wiethölter 2000, 2002a,b).

O pH (potencial hidrogeniônico) indica a quantidade de íons de hidrogênio (H^+) que existe na solução no solo. Um solo ácido possui muitos íons H^+ e poucos íons cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+). Com o valor do pH, pode-se ter indícios das condições químicas do solo, além de ser o indicador de uma situação biológico-físico-química. Valores de pH baixos trazem prejuízo ao desenvolvimento da planta, e a capacidade produtiva será afetada (Nolla e Anghinoni, 2003).

No solo, deve-se buscar atingir valores de pH em água entre 5,5 e 6,3, já que, neste intervalo as plantas apresentam melhores condições de assimilação dos nutrientes potássio, enxofre, nitrogênio, fósforo e molibdênio (Malavolta, 1987). Uma das formas da correção da acidez do solo seria a liberação de íons OH^- para a neutralização dos prótons (H^+) presentes na solução do solo, sendo o calcário, quando dissolvido em água, o material mais utilizado para ter esse efeito.

Ao reagir no solo, o calcário forma íons cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), carbonatos (CO_3^{2-}) e bicarbonatos (HCO_3^-). São os íons carbonatos e bicarbonatos que possibilitam a formação de hidroxilas (OH^-) que irão neutralizar o hidrogênio da solução do solo. Além disto, os íons hidroxilas entram em contato com o alumínio (Al^{3+}), assim como com os íons magnésio (Mg^{2+}) e hidrogênio (H^+), aumentando o deslocamento da reação para que todo calcário aplicado neutralize a acidez do solo (Bohnen, 2000).

O calcário é um insumo relativamente barato, essencial ao aumento da produtividade, e, entre as práticas agrícolas, poucas dão um retorno elevado a curto prazo. Além de promover a correção da acidez do solo, também tem muitas ações quando recomendado em dosagens que estão em conformidade com as características do solo (Primavesi, 1979). Desta forma, dosagens adequadas de calcário proporcionam não apenas aumento de produtividade na cana-planta como também garantem o desempenho da cana soca devido ao efeito residual (Embrapa, 2015).

Desta forma, a calagem pode proporcionar inúmeros benefícios, e se estende a aumentar o pH; a melhorar as propriedades físicas dos solos como a macroporosidade do solo; a neutralizar o alumínio e o manganês tóxicos; ao aumento dos teores de

cálcio, magnésio, disponibilidade de fósforo e molibdênio, e ao aumento da capacidade de troca catiônica efetiva; ao aumento da atividade de microrganismos que atuam na decomposição de matéria orgânica e na fixação do nitrogênio, e a aumentar a produtividade e a longevidade do canavial (Ronquem , 2010 ; Penatti, 2013; Embrapa , 2015).

Além do calcário, os produtos corretivos da acidez do solo são encontrados na cal virgem, na cal hidratada ou extinta, no calcinado, na escória de siderurgia, nas margas (depósitos terrestres de carbonato de cálcio), nas calcárias marinhas e nos subprodutos de diversas indústrias (Penatti, 2013). Esses produtos irão disponibilizar princípios ativos para a reação do solo tais como carbonatos de cálcio (CaCO_3) e/ou magnésio (MgCO_3), óxidos de cálcio (CaO) e/ou de magnésio (MgO), hidróxidos de cálcio $\{\text{Ca}(\text{OH})_2\}$ e/ou de magnésio $\{\text{Mg}(\text{OH})_2\}$ e silicatos de cálcio (CaSiO_2) e /ou de magnésio (MgSiO_2).

Dependendo das bases químicas, a reação no solo será mais ou menos rápida, sendo os carbonatos (CO_3^{2-}) e os silicatos (SiO_3^{2-}) neutralizantes mais lentos, e óxidos e hidróxidos mais rápidos, devido à base hidroxila (OH^-) ser mais forte (Penatti, 2013).

A necessidade de calcário indica a quantidade de corretivo para neutralizar a acidez a partir das condições iniciais de um solo (Ribeiro et., 1999). Para a recomendação de calcário, deve-se relacionar não apenas a concentração de hidrogênio, como também a capacidade tampão do solo, que está diretamente ligado aos tipos de argila e ao conteúdo da matéria orgânica no solo (Defelipo et al., 1972).

Grandes prejuízos ao agricultor podem ser ocasionados se as análises das amostragens de solos forem interpretadas inadequadamente. A tomada de decisão para aplicar, ou não, calcário virá destes índices. Apesar das inúmeras equações de recomendações para aplicação de corretivos, muitas não contemplam a situação de aplicação sobre a palha em soqueiras, posto que acarreta na deposição de palhada seca em até 15 a 20 t ha⁻¹, alterando as condições edáficas da superfície do solo e, por sua vez, a dinâmica da água no solo, e consequentemente, o desenvolvimento do sistema radicular e da planta (Faroni et al., 2012).

Caires et al. (2000) observaram que a palha em superfície alterou bem mais os valores de pH, saturação de bases (V%), hidrogênio e alumínio (H +Al), cálcio e magnésio do que em subsuperfície, onde estas alterações foram muito pequenas. Raij (2007) também mostra uma movimentação limitada de bases para camadas mais profundas do solo em sistemas de plantio direto. A cana-de-açúcar tem uma significativa concentração de raízes em subsuperfície, e os desenvolvimentos destas raízes dependem de um adequado suprimento de cálcio, e da inibição da toxidez do alumínio (Al^{3+}) subsuperficial (Penatti, 2013).

A recomendação proposta pelo comunicado técnico 177 da Embrapa Cerrados (2015) quanto à correção da acidez do solo por meio da calagem destaca o pH, a saturação por bases (V%), a capacidade de troca catiônica (CTC), e o fator de correção da qualidade do calcário (f). Estes fatores estão relacionados de acordo com a seguinte equação: $\text{NC} = \text{necessidade de calcário em tonelada por hectare} = (V_2 - V_1)T \times f / 100$; em que V_2 : saturação por bases que se deseja ; $V_1 = S/T \times 100$ = saturação por base atual; T =capacidade de troca de cátions a pH 7 (H+Al+S) em $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$; S =soma de bases (Ca+Mg+K) em $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$; f =fator de correção da qualidade do calcário = $100/\text{PRNT}$; PRNT = poder relativo de neutralização total.

As recomendações buscam elevar a porcentagem de saturação por bases (V%), e de certa forma, condicionar valores de CTC a 70% (Centro Sul e Sudeste) ou a 50% (Centro - Oeste do Brasil) (Sousa e Lobato, 2004). Para o Estado de São Paulo, f , em média, é 1,5 (Sousa et al., 1989; Quaggio, 2000; Raij et al., 2001; Embrapa, 2015). O comunicado técnico 177 da Embrapa Cerrados (2015) apresenta os seguintes critérios para direcionar a aplicação de calcário: Latossolos com pH <5,2 e neossolos com pH<5,5, corrigir V_2 para 60%; Solos com textura arenosa ($\leq 15\%$ de argila) ou média(16 a 35% de argila), com $\text{CTC} < 4 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, corrigir o V_2 para 70%; caso contrário, corrigir V_2 para 50%.

Para a cultura de cana-de-açúcar em sistemas de sequeiro, recomenda-se elevar V_2 a 50%, utilizando calcário que complemente o teor de magnésio no solo para valores de, pelo menos, $0,5 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ (Sousa e Lobato, 2004). Em sistemas irrigados, pode-se aplicar V_2 a 70%, posto que é considerada a intensidade de cultivo (Embrapa, 2015).

As análises convencionais utilizam inúmeros reagentes, demandam tempo e investimento, além de aumentar as chances de exposição de produtos nocivos à saúde, requerendo, assim, maneiras alternativas que auxiliam de forma prática, menos onerosa e impactante ao ambiente para auxiliar na identificação dos elementos do solos. Bahia et al. (2017), em seus estudos sobre estimação de atributos do solo, mostraram que a SM é uma importante ferramenta para auxiliar no mapeamento de áreas específicas de manejo.

De forma prática, a SM consegue captar as diferenças dos atributos do solo quando analisado em grande quantidade de amostras, em menos tempo e com boa precisão, mostrando ter potencial para complementar grande parte das análises convencionais de laboratório (Barrón e Torrent, 1986; Brown et al., 2006; Viscarra Rossel et al., 2006, 2010; Bahia et al., 2014, 2015a, b; Camargo et al., 2015, 2016). Sendo a SM uma técnica sensível às variações mineralógicas do solo e aos intervalos de classes texturais, o que a faz identificar melhor detalhamento e readequação das classes de solo, tem potencial em auxiliar nas recomendações de calagem, já que consegue acompanhar as variações químicas do solo ao longo da paisagem.

1.2.2 Gessagem para cana-de-açúcar

A incorporação do calcário abaixo de 40 cm de profundidade para a correção da acidez do solo é praticamente inviável (Souza et al., 2015). As camadas mais profundas continuam com teores baixos de cálcio associados ou não ao excesso de alumínio tóxico (Embrapa, 2015). Sem correção da acidez em subsuperfície, as raízes da cana encontram mais limitações para o desenvolvimento. No entanto, ao aplicar gesso agrícola, o sulfato irá movimentar-se para camadas inferiores acompanhando-se por cátions, especialmente o cálcio, facilitando, assim, o melhor desenvolvimento das raízes (Quaggio, 2008).

Experimentos conduzidos na Embrapa Cerrados demonstraram ganhos de 17,2% na quantidade de raízes e 18,2% em produtividade total de colmos de cana-

planta e quatro de socas com o uso do gesso agrícola (Sousa e Lobato; 2004). Este aumento de produtividade pode ter ocorrido devido à boa distribuição das raízes na subsuperfície até 80 cm de profundidade.

O gesso pode ser encontrado como minério (gesso de jazidas) ou como subproduto da indústria de fertilizantes (gesso agrícola). Também conhecido com os nomes de fosfogesso ou simplesmente gesso (sulfato de cálcio – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), o gesso agrícola é um subproduto da fabricação do ácido fosfórico que é necessário à produção de superfosfato triplo e de fosfato de amônio (MAP e DAP). Para cada tonelada de P_2O_5 produzida, tem-se a produção de 4,5 toneladas de gesso (Paolinelli et al., 1986). A solubilidade do gesso agrícola em água a 25°C chega a ser 146 vezes mais solúvel que o calcário (Vitti, 1987).

Em doses adequadas, o gesso pode atuar na correção de solos salinos, na correção de alumínio trocável da camada subsuperficial do solo, ser fonte de cálcio e enxofre, e reduzir perdas de nitrogênio em aplicações com compostagem à base de esterco (Ritchey et al., 1980; Quaggio et al., 1982; Ferreira et al., 2007). Contudo, o uso excessivo e não adequado do gesso irá acarretar a lixiviação de bases trocáveis, principalmente de cálcio, magnésio e potássio (Malavolta et al., 1981). Em sistema de plantio direto, usa-se gesso com a finalidade de adicionar enxofre e cálcio, em resposta à complementação de nutrientes devido aos baixos teores de enxofre nos perfis dos solos tropicais (Vitti et al., 2008).

Segundo Cruciol et al. (2003), a reação no solo quanto à calagem e à gessagem depende da dose, mas também das características químicas e físicas do solo, do manejo da adubação, da reatividade do corretivo e da precipitação pluvial. Com o sistema de plantio direto, aplicando calagem e gessagem, por exemplo, as maiores alterações de cálcio limitaram-se à camada de 10 cm, e do primeiro até o terceiro ano, o teor de magnésio movimentou progressivamente até os 60 cm de profundidade (Cruciol et al., 2003). Entretanto, Faroni et al. (2010), em experimentos conduzidos em Latossolos e em ambiente de produção restrito, não observaram diferenças significativas como resposta dos produtos aplicados de calagem e gessagem. O que justifica, assim, cada vez mais, estudos nesse sentido de observação de aplicação de

calagem e gessagem em plantio direto, em diversas situações, para observar os efeitos e as eficiências das dosagens recomendadas.

Em doses elevadas, o gesso agrícola pode chegar a elevar os teores de cálcio, magnésio e enxofre do lençol freático, mas em doses adequadas podem trazer retornos econômicos favoráveis. Em estudos de avaliação econômica conduzidos por Araújo et al. (2015), em quatro canas socas em Latossolo Vermelho no Cerrado, o ganho do ATR proporcionado pelo uso do gesso, a 5 toneladas por hectare, foi de R\$ 6,93 para cada R\$ 1,00 investido em gesso. Em superdosagens, com a aplicação de 10 toneladas por hectare, o retorno econômico caiu para R\$ 5,76 a cada R\$ 1,00 investido em gesso agrícola.

Diversas recomendações foram propostas para aplicar gesso agrícola baseando-se no nível de cálcio e na saturação por alumínio em camadas de 25 a 50 cm de profundidade. Penatti e Forti (1994) sugeriram, por exemplo, de forma simplificada, aplicar 2 toneladas por hectare de gesso em solos arenosos e textura média, e até 3 toneladas por hectare para solos argilosos e muito argilosos. Contudo, muitos autores compartilharam a ideia que o gesso complementava a ação do calcário, tanto para diminuir a ação da toxidez de alumínio em profundidade, como para propiciar melhorares condições para o desenvolvimento do sistema radicular (Lopes, 1999; Dematte, 1986; Malavolta, 1991; Souza, 1992; Raij et al., 1996).

Amostragem do solo em profundidade abaixo de 20 cm é necessária para a aplicação de gesso agrícola em cana-de-açúcar. Também é importante determinar o teor de argila em profundidade nas amostras, já que a argila é determinante na capacidade de retenção ou de adsorção do sulfato e da extensão de sua lixiviação no perfil do solo e consequentemente, por permitir o sulfato e cátions (bases) acompanhantes para as camadas mais profundas do solo. Desta forma, os critérios de recomendação proposto pelo comunicado técnico da Embrapa (2015) para aplicação de doses de gesso agrícola úmido (D.G), também conhecida como gessagem, com 15% de enxofre, em cana-de-açúcar será:

$$\text{D.G. (kg ha}^{-1}\text{)} = 75 \times \text{argila (\%)}$$

Aplicado quando a saturação de alumínio em porcentagem (m%) for maior que 20% e/ou quando o teor de cálcio for menor que $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Sousa e Lobato, 2004). As recomendações são baseadas na camada de 60 a 80 cm, mas, para medidas paliativas, em camadas de 20 a 40 cm, recomenda-se a aplicação quando a saturação por bases (V%) for menor que 50%.

O gesso agrícola, quando em contato com a água, infiltra-se no solo, pois em camadas aráveis em que há maior teor de matéria orgânica, fósforo proveniente das adubações e acidez corrigida, fazem com que o sulfato do gesso, ao se dissolver, passe para camadas subsuperficiais; logo, não havendo necessidade de incorporar ao solo o gesso, pode, assim, ser aplicado a lanço. Há possibilidade também de se dividir a aplicação da gessagem em duas ou três parcelas, visando a canavial com longevidade de cortes. Já há estudos que mostram o aumento da produtividade agrícola com a reaplicação de gessagem em cana-de-açúcar (Sousa e Lobato, 2004).

Mesmo em recomendações adequadas, deve-ser levar em consideração que a gessagem não substitui a calagem, já que ambas são quimicamente diferentes e tem ações diferentes no solo. Assim, de acordo com Raij (2007), a redução da acidez continua sendo uma necessidade e não é possível substituir a calagem pela gessagem.

O aumento da suscetibilidade magnética acompanha os maiores teores de argila e de óxidos de ferro (Fontes et al., 2010; Camargo et al., 2013). Singer et al. (1996) destacam que o comportamento magnético é mais evidente em solos cuja fração argila é maior devido à magnetita ser oxidada em maghemita (maior expressão magnética), enquanto na fração areia a magnetita é oxidada diretamente em hematita (menor expressão magnética). Peluco et al. (2015) observaram que em solos com baixos teores de argila, como em Neossolos Quartzarênicos (RQod), foram encontrados menores valores de SM do que em solos eutroféricos (LVef).

Bahia et al. (2017), estudando as predições de atributos químicos em solos tropicais por meios de técnicas indiretas, observaram que a SM teve mais acurácia e menos desvio nas predições de argila do que outros métodos alternativos, como a espectroscopia de reflectância difusa (ERD). Como o teor de argila é relacionado com as dosagens de gesso agrícola pela recomendação da Embrapa (2015), e tendo a

suscetibilidade magnética do solo capacidade de quantificar indiretamente porcentagem de argila do solo, pode-se salientar que as recomendações de gessagem com o apoio da técnica da suscetibilidade magnética do solo serão promissoras e ajudarão a mapear áreas que receberão diferentes dosagens de gesso.

1.2.3 Fosfatagem e sua importância para cana-de-açúcar

O fósforo é um dos nutrientes que mais limitam a produção vegetal no Brasil (Malavolta, 2006). Diversos autores consideram a importância da adubação fosfatada corretiva para o aumento da produtividade e a importância de considerar inúmeros fatores, tais como manejo adequado e influência do ambiente de produção sobre as variedades para boas respostas às adubações (Morelli et al., 1991; Cantarella et al., 2002; Figueiredo Filho, 2002; Lima et al., 2006; Rosseto et al., 2008).

A cana-de-açúcar no País é sustentada, entre outros fatores, pela intensa mecanização, o que resulta em modificações negativas nas propriedades físicas do solo (Stone e Silveira, 2001), e pela falta de fertilidade dos solos que, a exemplo do nutriente fósforo, mesmo quando o teor total for elevado, a interação com o solo pode não disponibilizar esse nutriente à planta (Rolim Neto, 2004). Principalmente em Latossolos, esta adsorção do fósforo em solos deve-se ao fato de ser ele um ânion fortemente retido (Raij, 1991; Motta et al., 2002; Schaefer et al., 2003).

Altas doses de fertilizantes fosfatados são aplicadas aos solos buscando manter níveis economicamente sustentáveis da produtividade de cana-de-açúcar. Apesar de não ser uma prática generalizada entre os produtores, a adubação fosfatada corretiva a lanço em profundidade (fosfatagem) visa a elevar o teor de P dos solos, sendo aplicada em pré-plantio na cultura da cana-de-açúcar com doses entre 80 e 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Zambello Júnior e Azeredo, 1983).

A adsorção do fósforo acontece principalmente devido aos óxidos de ferro e alumínio (Camargo et al., 2013a), minerais secundários (Barron e Torrent, 1986) e à suscetibilidade magnética do solo (Fine et al., 1993). Diversos autores destacam a

presença do óxido de ferro, goethita, da fração argila, como responsável direto pela adsorção do fósforo dos solos tropicais (Motta et al., 2002; Johnson e Loeppert, 2006; Ulén e Snäll, 2007; Heredia e Cirelli, 2007). De acordo com Inda Júnior e Kämpf (2005) a adsorção do fósforo é favorecida com a substituição isomórfica do ferro pelo alumínio, que irá provocar o aumento da área superficial específica devido a este desarranjo estrutural, possibilitando, assim, maior adsorção do fósforo.

De acordo com Resende e Furtino Neto (2007), a indisponibilização do fósforo é mais intensa quanto mais intemperizado, ácido, argiloso e oxidado for o solo. A absorção de fósforo pelas plantas ocorre na forma iônica (H_2PO_4^-), por meio da solução do solo. Além de estar na forma de solução, há mais dois tipos de formas de fósforo no solo, que são o fósforo lábil e o não lábil. O fósforo lábil não está prontamente disponível para a planta, posto que pode estar fracamente adsorvido quando ligado ao alumínio, ao ferro ou ao cálcio, ou em matéria orgânica do solo e em argilas silicatadas do tipo 1:1. Fósforo não lábil é quando o fósforo está em minerais mineralogicamente estáveis (Parfitt, 1978; Moura, 2014; Raij, 2004; Gatiboni, 2003).

A calagem pode reduzir a adsorção de fósforo, uma vez que torna cada vez mais negativa a carga do plano de adsorção e eleva a repulsão por fosfato. Assim, reduzindo a adsorção de fósforo, haverá mais disponibilidade de fósforo vindo dos fosfatos solúveis com o uso do calcário (Haynes, 1984; Camargo et al., 2007b). Como nutriente que limita a produtividade e a longevidade dos canaviais, o fósforo tem importância na fotossíntese, no desenvolvimento radicular, no perfilhamento, e na qualidade do caldo da cana (Meyer e Wood, 2001; Moura et al., 2005), já que influencia na porcentagem aparente de sacarose contida no caldo da cana (pol%) e na pureza do caldo (Simões Neto et al., 2009).

A deficiência do fósforo em solos pode reduzir a absorção do nitrogênio, dificultar a clarificação do caldo durante a fabricação do açúcar, e elevar o custo de fabricação, pois será necessário adicionar fosfatos solúveis para atingir níveis ideais de P_2O_5 a fim de realizar uma clarificação eficiente (Mahadevaiah et al., 2007). O fósforo assume importância no enraizamento e no perfilhamento (Santos et al., 2011), e na produtividade final no rendimento de açúcar (Santos et al., 2010).

De acordo com Korndörfer (2004), o fósforo em cana-de-açúcar atua no metabolismo de formação de proteínas, no processo de divisão celular, na fotossíntese, no armazenamento de energia, no desdobramento de açúcares, na respiração, no fornecimento de energia a partir do ATP e na formação de sacarose. Diante de tanta importância, pela necessidade de aplicar fósforo em doses adequadas para uma boa população de colmos e para obtenção de soqueiras mais vigorosas, ele torna-se necessário.

Estudos conduzidos pela Embrapa Cerrados em diversas regiões e condições de solo mostram resultados positivos em resposta à fosfatagem corretiva do solo para cana-de-açúcar. Nesses estudos, o aumento médio da produtividade para cana-planta proporcionado pela fosfatagem foi de 17 toneladas por hectare (Morellui et al., 1991; Caione et al., 2011; Mendonça et al., 2015), sendo as menos responsivas a essa fosfatagem corretiva as com solos de média a alta disponibilidade de fósforo. Para cana-soca, considerando o efeito residual da fosfatagem, a média de aumento de produtividade foi de 13 toneladas por hectare por corte (Sousa e Lobato, 2004).

Se o teor de fósforo atual estiver abaixo de 20 mg dm^{-3} , além da adubação fosfatada de plantio, deve se realizar a fosfatagem corretiva, de modo que a recomendação P_2O_5 (kg ha^{-1}) seja: [teor desejado de fósforo – teor atual] x capacidade-tampão de P no solo (Tabela 1).

Tabela 1. Fosfatagem Corretiva⁽¹⁾

Textura	Argila	Capacidade-Tampão de P do solo	
		Resina	Mehlich -1
	%	$(\text{kg ha}^{-1} \text{P}_2\text{O}_5/\text{mg dm}^{-3} \text{P})$	
Arenosa	≤ 15	6	5
Média	16 - 35	9	9
Argilosa	36 - 60	14	30
Muito argilosa	> 60	19	70

⁽¹⁾ Adaptado de Sousa et al. (2006).

A fosfatagem corretiva deve ser a lanço em área total, com incorporação superficial (Embrapa, 2015). Embora exista divergência entre autores que recomendam

a aplicação de fertilizantes fosfatados solúveis em água, ou em CNA+H₂O, muitos pesquisadores recomendam a aplicação de fontes de solubilidade moderada, como os fosfatos naturais reativos. É consenso que não se deve utilizar rocha natural para fosfatagem, como apatita, ou concentrado apatítico, devido à baixíssima solubilidade e à reduzida eficiência agrônômica.

A adubação fosfatada corretiva pode ser usada antes ou em período prévio à fosfatagem do plantio, e pode beneficiar a soqueira dos canaviais de tal modo a desenvolver melhores condições de aporte ao solo de biomassa e de restos culturais que favoreçam o desenvolvimento da cana. A fosfatagem deve ser realizada após a calagem e a gessagem, sendo a última operação antes da sulcação para o plantio de cana-de-açúcar. A fosfatagem realizada em pré-plantio tem efeito residual que varia de dois a três anos, dependendo da textura do solo e dos níveis de produtividade obtidos.

Nos solos tropicais, a deficiência e as complexas reações de adsorção e dessorção do fósforo nos solos tropicais justificam estudos que relacionam o nutriente P e os constituintes do solo, isto porque são destas reações que limita a disponibilidade deste nutriente para as plantas (Jaisi et al., 2010; Gonçalves et al., 2011). Estudos que buscam compreender as causas de adsorção do fósforo em contexto solo-paisagem podem favorecer os diversos tipos de manejo que têm a interferência do fósforo para prescrever a recomendação, como a fosfatagem, além de beneficiar as perdas de P e suas consequências como a eutrofização de corpos d'água (Horta e Torrent, 2007).

O fósforo adsorvido, avaliado quimicamente, é um processo que demanda tempo, uso de reagentes e a destruição de amostras. Isto traz uma inviabilidade econômica e ambiental quando a avaliação é feita em grande número de amostras. Desta forma, cada vez mais a procura por ferramentas, como a suscetibilidade magnética do solo para a predição do fósforo, torna-se importante para o mapeamento do fósforo visando ao manejo de grandes áreas agrícolas (Achat et al., 2011).

Os óxidos de ferro da fração argila têm grande potencial para a predição do fósforo do solo, e assim, das recomendações de fosfatagem, já que nesta recomendação, o elemento fósforo influencia as dosagens de fosfatagem a serem aplicadas no solo (Schwertmann e Taylor, 1989; Camargo et al., 2013a). Kämpf e Curi

(2000) ressaltam que os óxidos e hidróxidos de ferro são importantes indicadores pedogenéticos por terem sua formação influenciada pelas condições do ambiente e por persistirem ao longo tempo no solo. Como a suscetibilidade magnética representa espacialmente os óxidos de ferro e permite, por meio de uma função de pedotransferência, o mapeamento do fósforo adsorvido com maior acurácia (Camargo et al., 2013), as recomendações de fosfatagem por meio da SM podem ser uma promissora ferramenta de quantificação indireta para identificar o zoneamento de áreas específicas, visando à fosfatagem corretiva do solo.

1.2.4 Assinatura magnética e suas aplicações

Assim como a preocupação em gerar formas de aumentar a utilização de forma racional de recomendações de correção e adubação do solo, visto que tais recursos se encontram escassos, também surge a preocupação em direcionar técnicas alternativas para as análises convencionais do solo. A agricultura atual está carente de metodologias mais rápidas e econômicas, de fácil mensuração e que agredam menos o ambiente para a realização das análises do solo (Capurro, 2004).

Tendo em vista o elevado número de amostras que são necessárias para caracterização de áreas de manejo específico (Viscarra Rossel et al., 2006; Tittone et al., 2008), a ciência do solo tem proposto o uso de funções de pedotransferência para estimar, de forma indireta, os atributos do solo de modo simples, rápido e confiável. Funções de pedotransferência são modelos matemáticos utilizados para estimar os atributos do solo a partir de outros atributos medidos, mas com a vantagem de usar atributos de maior facilidade e de baixo custo (Mcbratney et al., 2002). Um exemplo desta propriedade é a suscetibilidade magnética do solo (SM), a qual tem demonstrado apresentar relação de interdependência entre os atributos do solo (Petrovský et al., 1999; Grimley e Vepraskas, 2000; Royal, 2001).

As propriedades magnéticas já foram utilizadas há décadas, e são mais focadas nos levantamentos de solos do estado de São Paulo (Becegato et al., 2005). Com as

reais necessidades pautadas na preocupação ambiental e o uso de descarte adequado de reagentes e resíduos agroindustriais, a SM tornou-se promissora estratégia na quantificação indireta dos atributos do solo (Dearing et al., 1996; Grimley et al., 2004; Bahia et al., 2018). Estas preocupações são devidas aos cuidados operacionais na maioria dos atuais laboratórios agrícolas que direcionam atenção para evitar vazamentos, derramamentos e desperdício de produtos químicos. Além disso, evitam que as embalagens, e os demais resíduos contribuam para a poluição do solo e/ou da água, e sejam descartadas em recipientes inadequados.

A medição feita por esta técnica sofre variações em função do teor de água no solo, e muitas pesquisas a têm utilizado com êxito na quantificação indireta de propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo (Siqueira et al., 2015). Já há protocolos em mais de 40 mil hectares do Estado de São Paulo utilizando a suscetibilidade magnética do solo para diagnosticar a erosão (Barbosa, 2014), o planejamento amostral e potencial de produção de cana (Siqueira et al., 2010 a e b), o mapeamento de atributos de solo (Bahia et al., 2017), e a compactação do solo (Cortez, 2013).

A suscetibilidade magnética do solo (SM) é o resultado da translação e rotação dos elétrons que constituem alguns minerais que estão presentes nos solos, nos sedimentos e nas rochas (Craik, 1995; Luque, 2008). Pode ser entendida como a facilidade de magnetização de um material em resposta a um campo magnético aplicado. A SM possui grande potencial de uso quando se considera que toda a dinâmica física e química do solo é coordenada pela sua mineralogia (Grimley e Vepraskas, 2000; Becegato e Ferreira, 2005; Siqueira et al., 2010a).

Fatores como clima (Eyre e Shaw, 1994; Dearing et al., 2001; Maher et al., 2003), material de origem (Singer et al., 1996; Fontes et al., 2000; Hanesch et al., 2001), relevo (Jong et al., 2000), regime hídrico (Maher, 1998), fauna/flora (Dearing et al., 1995), erosão, influência antrópica (Hanesch e Scholger, 2005) e tempo (Singer et al., 1992; White e Walden, 1997) podem afetar a SM. Isto porque a SM é sensível às variações dos fatores e processos de formação do solo, e pode ser expressa nas propriedades cristalográficas dos minerais presentes nos sedimentos e no solo.

Como esses fatores e processos são específicos para cada local, a SM mostra-se uma promissora ferramenta para conhecer a variabilidade espacial do solo destes locais (Siqueira, 2010c), principalmente nos solos tropicais. Devido às dimensões continentais do País, com diversas áreas para expansão agrícola, os estudos da variabilidade espacial dos solos são ainda incipientes.

Como ferramenta às dimensões continentais do País, a SM tem-se mostrado ideal para a realização de estudos que requerem grande quantidade de amostras, como os de variabilidade espacial (Dearing et al., 1996). Isto acontece devido ao baixo custo da técnica, por ser relativamente sensível, rápida e com menor impacto ambiental no que diz respeito ao uso de reagentes químicos de análises convencionais.

O produtor que aspira a produtividades acima dos três dígitos, tem como meta conhecer mais sobre as variações físico-químicas do solo, a nível de quadra, para recomendar maiores ou menores dosagens de adubação. A importância para a identificação do potencial agrícola (Siqueira, 2010c) e do desenvolvimento sustentável das práticas de manejo do solo (López, 2009) farão mais sentido quando as pesquisas em trabalhos geofísicos forem mais assertivas. Neste sentido, uma das vantagens da SM é de ser uma técnica que pode ser realizada no campo e empregada como complemento de outros tipos de análises laboratoriais. A avaliação do atributo SM, portanto, pode auxiliar no mapeamento de áreas homogêneas de forma mais rápida e econômica.

Sob o ponto de vista do desenvolvimento de mapas de recomendação de calagem, gessagem e fosfatagem corretiva do solo, o uso da SM é interessante para zonear as doses destas recomendações. Dessa forma, a SM apresenta-se como uma ferramenta de técnica indireta para identificar áreas com diferentes potenciais para as recomendações de adubação (Souza Júnior et al., 2008; Santos et al., 2011; Matias et al., 2013; Siqueira et al., 2015a).

1.2.5 Análises Multivariadas

O cenário de gestão agrícola atual depende de muitos fatores quantitativos, que são bastante complexos e exige árduo trabalho para atender às exigências de uma produção mais sustentável, com menos custo, e busca da excelência ao desempenho. Para descrever as relações dos atributos do solo, planta e clima, nem sempre a estatística convencional é suficiente, e uma das propostas nas ciências agrárias para compreender melhor as relações de inter e intradependência nos sistemas agrícolas, é com o uso das análises multivariadas (Marques Jr., 2009; Siqueira et al., 2010).

Com o propósito de observar um sistema complexo em um ângulo que propicie simplificar ou facilitar a interpretação de um fenômeno por meio da análise simultânea de todas as variáveis medidas, os métodos de estatística multivariada são aplicados em diversas áreas do conhecimento, tais como na biologia, nas ciências sócias e na psicologia (Khattree e Naik, 2000; Johnson e Wichern, 2002).

Os dois grupos em que as análises multivariadas se dividem são as técnicas exploratórias de simplificação, das quais fazem parte a análise de componentes principais (ACP), a análise fatorial, a análise de correlações canônicas (ACC), a análise de agrupamentos ou cluster, a análise discriminante e a análise de correspondência; e as técnicas de inferência estatística, que são compostas pelos métodos de estimação de parâmetros, pelos testes de hipóteses e pela análise de variância, covariância e regressão multivariada (Mingoti, 2005; Ferreira, 2008; Siqueira et al., 2010).

A ACP (Análise de Componentes Principais) buscar encontrar, em um conjunto de dados, um atributo que seja capaz de explicar parte significativa da variância da população amostrada por meio de correlações. Este tipo de análise torna-se interessante nos casos de recomendações de adubo com calagem, gessagem e fosfatagem, porque irá eleger entre os muitos atributos que interferem nas dosagens das recomendações, um mais significativo (Theocharopoulos et al., 1997).

Vários autores usaram a técnica da multivariada na ciência do solo, tais como em estudos envolvendo a relação entre suscetibilidade magnética do solo e os atributos físicos, químicos e mineralógicos da cana-de-açúcar (Marques et al., 2014); a avaliação

dos atributos do solo em diferentes tipos de manejo (Freitas et al., 2015); na mineralogia da fração argila e na caracterização do solo no Planalto Ocidental Paulista (Silva 2016 ; Costa 2017); em estudos de compactação e atributos físicos em manejo com e sem cobertura vegetal (Gomes et al., 2018). Todos estes trabalhos usaram a técnica da ACP para compreender melhor as observações de como os atributos estão relacionados em um mesmo sistema.

Neste intuito, com a técnica da ACP, a suscetibilidade magnética do solo poderá ser analisada com o intuito de observar o quanto é capaz de explicar parte significativa da variância nas recomendações de calagem, gessagem e fosfatem corretiva do solo.

1.2.6 Análises Geoestatísticas

1.2.6.1 Variogramas

Ao longo de paisagens heterogêneas, não é aplicado o delineamento estatístico convencional, pois em áreas relativamente pequenas e uniformes os atributos do solo têm baixa variabilidade (Bishop e Lark, 2006; Campbell, 1987; Burgess e Webster, 1980). A estatística clássica considera que a variabilidade em torno da média é aleatória e independe da distribuição geográfica da unidade amostral. Porém, muitos estudos mostram que o aspecto aleatório da variabilidade do solo, frequentemente possui um componente que é espacialmente dependente. (Campbell, 1987; Burgess e Webster, 1980; Vieira et al., 1981; Mcbratney et al., 1982; Trangmar et al., 1985).

Em geral, os atributos do solo não são aleatoriamente distribuídos no espaço (Russo e Bresler, 1981). Alguns autores consideram que os métodos estatísticos e as amostragens de solo convencionais de coleta de solos, normalmente, são inadequados para os estudos que visam a entender os processos responsáveis pela variabilidade do solo (Upchurch e Edmonds, 1993). Isaaks e Srivastava (1989) propõem que as análises estatísticas clássicas que consideram a independência entre as amostras baseadas na média, podem ser utilizadas, mas que apresentarão maior sucesso quando associadas e amparadas por análises geoestatísticas (Reichardt et al. 1986).

A geoestatística é usada para compreender a distribuição espacial dos atributos físicos e químicos do solo (Vieira et al., 1983; Scott et al., 1994; Cambardella et al., 1994; Paz et al., 1996; Montanari et al., 2005) e dos atributos da planta (Tabor et al., 1984; Mulla, 1993; Salviano et al., 1995). No contexto das relações solo-paisagem, o uso da geoestatística, no estudo da distribuição espacial, possibilita nova interpretação da interação entre atributos do solo e atributos das culturas.

O estudo da variabilidade dos atributos do solo é de extrema importância para o refinamento das práticas de manejo e do planejamento agrícola sustentável (Siqueira et al., 2015). Para a realização dos estudos que envolvem o refinamento das práticas de manejo e do planejamento agrícola sustentável, pesquisadores têm utilizado métodos de classificação numérica, estatística multivariada, lógica fuzzy, geoestatística, métodos de fractais, entre outros (Cambardella et al., 1994; Souza et al., 2003; Burrough et al., 1994). Embora todos estes métodos permitam inferir sobre a variabilidade espacial do solo, a dependência espacial entre as amostras somente pode ser modelada por meio da geoestatística (Mulla et al., 1993; Webster, 2000).

A geoestatística surgiu de uma situação de garimpo na África do Sul, quando o engenheiro de minas Daniel Gerhardus Krige, observou que não conseguia encontrar sentido nas variâncias, nos cálculos das reservas das minas de ouro. Com efeito, somente na década de 60 que o também engenheiro de minas George Matheron, na França, formalizou a teoria das variáveis regionalizadas, que é a base da geoestatística. (Barbieri, 2007).

O conceito de variáveis regionalizadas, segundo Matheron (1963), é de uma função espacial numérica que varia de um local para o outro, com uma continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples. As primeiras aplicações da geoestatística ocorreram na mineração (David, 1970; Journel, 1974), posteriormente em hidrologia (Delhomme, 1976), até que esta técnica passou a ser utilizada em estudos da variabilidade de atributos do solo (Vieira et al., 1983; Trangmar et al., 1985; Souza et al., 1997; Berg e Oliveira, 2000; Silva et al., 2004).

A dependência espacial somente pode ser modelada por meio da geoestatística (Mulla et al., 1992; Webster, 2000). 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 (Trangmar et al., 1985).

Dentre as ferramentas da geoestatística, está o semivariograma. Com esta técnica, é possível estudar o grau de dependência espacial entre os pontos amostrais distribuídos em um esquema sistemático (Issaks e Srivastava, 1989). O semivariograma é um gráfico da função semivariância *versus* distância. A semivariância, em uma dada distância é estimada pela seguinte equação:

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

Em que:

$\hat{\gamma}(h)$ é o semivariograma experimental;

$N(h)$ é o número de pares experimentais de dados separados pelo vetor h ;

Z representa os valores medidos para atributos.

O semivariograma é representado pelo gráfico da semivariância (Figura 2.1) - $\hat{\gamma}(h)$ versus a distância (h) e possui os seguintes parâmetros: a) efeito pepita (C_0), que representa erros na medição ou de variabilidade em pequena escala; b) patamar ($C_0 + C_1$), que é atingido quando a variância dos dados se torna constante com a distância entre as amostras; c) o alcance (a), que é o valor de h no qual $\hat{\gamma}(h)$ se estabiliza, ou seja, os pontos localizados numa área de raio igual ao alcance (a) são mais homogêneos entre si do que aqueles localizados fora dela (Vieira, 2000).

No semivariograma, o alcance (a) é indicador da distância de separação em que, dentro dela, existe dependência entre os pontos amostrados (Issaks e Srivastava, 1989). Alguns autores também ressaltam que a variância pepita (C_0) indica a variabilidade não explicada, ou seja, a variação que é independente, causada, entre outros fatores, por erros de medição ou de microvariações não detectadas quando é considerada a distância de amostragem utilizada (Cambardella et al. 1994, Salviano et

al. 1998). Para Isaaks e Srivastava (1989), o patamar do variograma ($C_0 + C_1$) indica que os dados da variável não dependem umas das outras espacialmente, ou seja, as variáveis são separadas por uma distância onde a semivariância não é modificada (variância espacial independente).

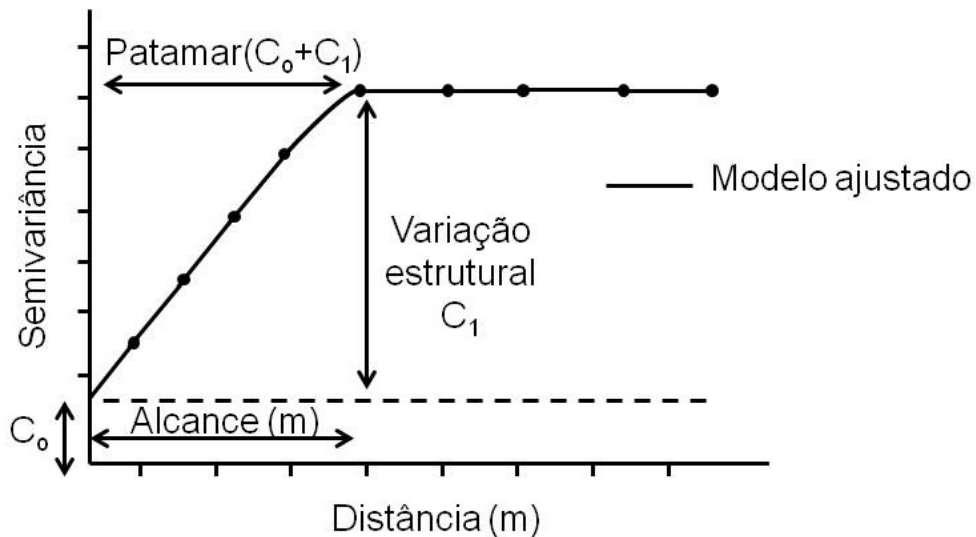


Figura 2. Variograma experimental de um atributo qualquer do solo.

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, seguindo uma classificação segundo Cambardella et al. (1994):

- 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.

Os modelos esférico, exponencial e gaussiano são os mais ajustados nos estudos da ciência do solo (Mcbratney e Webster, 1986). Quando há transições mais abruptas, que são mais fáceis de identificar em campo, o modelo esférico é mais direcionado ao ajuste (Cambardella et al., 1994), enquanto as transições mais sutis, as de difícil reconhecimento em campo, os modelos gaussiano e exponencial são mais associados (Burgess e Webster, 1980).

1.2.6.2 Semivariogramas cruzados

Entende-se como semivariograma cruzado a correlogramização das variáveis z e y (equação 2) (Deutsch e Journel, 1998).

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

Em que:

$\hat{\gamma}_{zy}(h)$ é a variância cruzada experimental em uma distância de separação h ;

$z(x_i)$ é o valor da variável primária (a ser estimada) no ponto i ;

$N(h)$ é o número de pares de pontos separados pela distância h .

No semivariograma simples, a semivariância é calculada para uma única propriedade. No caso do variograma cruzado somente nos locais onde ambas as variáveis (primária e secundária) são amostradas simultaneamente que se realizam os cálculos (Deutsch; Journel, 1998). Algumas características do variograma cruzado são:

- 1) Depende da direção, podendo ser anisotrópico;
- 2) Quando h for igual a zero, não é óbvio que o valor de $\hat{\gamma}_{zy}(0)$ seja nulo, pois além de espaços menores do que a distância de amostragem, tem-se a falta de correlação entre as duas variáveis;
- 3) O alcance representa a distância máxima de dependência espacial entre as variáveis.

Antes da modelagem do variograma cruzado, faz-se a verificação da presença do modelo linear de correlogramização, que é indicado pelos variogramas cruzados bem estruturados e proporcionais aos variogramas simples (Isaaks e Srivastava, 1989). Isto implica dizer que se a correlação entre variáveis z e y for negativa, a semivariância cruzada também será. Em situações em que existe a correlação espacial entre duas propriedades, a estimativa de uma delas pode ser feita usando-se informações de ambas: expressas no variograma cruzado e na co-krigagem (Goovaerts, 1997).

É por meio do semivariograma cruzado que se pode avaliar a correlação entre os atributos do solo a partir do conhecimento da dependência espacial (Vauclin et al.,

1983). O semivariograma cruzado pode assumir valores tanto positivos quanto negativos, com a diferença de que os positivos indicam que o aumento em um dos atributos é acompanhado pelo aumento do outro; e os negativos, que o aumento de um dos atributos ocorre pelo decréscimo do outro (Bhatti et al.1991, Mata, 1997).

1.2.6.3 Krigagem

O termo krigagem é derivado do nome Daniel Gerhardus Krige, que busca descrever um processo de interpolação dos dados, baseado a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. A diferença com outros métodos de interpolação está, portanto, na maneira como os pesos são atribuídos as diferentes amostras. Neste estimador, pontos com maior proximidade do lugar onde foi realizada a amostragem de dados têm maior peso do que os pontos mais distantes. Da mesma forma, ocorre com pontos agrupados e isolados, os primeiros tem um peso maior na estimativa do que os segundos (Vieira et al., 1983; Borgelt et al., 1994).

A krigagem, para possibilitar melhor estimativa de valores, utiliza um interpolador linear não tendencioso (Journel e Huijbregts, 1991; Isaaks e Srivastava, 1989; Vieira et al., 1983). Ela pode ser expressa sob a forma de mapas de isolinhas ou de superfície tridimensional. O valor estimado para os locais não amostrados pode ser definido pela equação 3.

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

Em que: $\hat{Z}(x_0)$: é o valor estimado para locais não amostrados (x_0); λ_i : é o peso atribuído a cada valor amostrado $Z(x_i)$; n : é o número de pontos vizinhos usados na estimativa; $Z(x_i)$: é o valor da variável Z no local x_i .

Quando se interpreta a distribuição espacial dos atributos do solo com um mapa da área de estudo, como os valores definidos pela krigagem, pela estimativa de valores em locais não amostrados, há maior planejamento de produção agrícola, dadas as áreas específicas de manejo que serão adotadas (Burgess e Webster, 1980).

1.3 Referências

Achat DL, Augusto L, Morel C, Bakker MR Predicting available phosphate ions from physical-chemical soil properties in acidic sandy soil under pine forest (2011) **Journal of Soils and Sediments** 11:452-466.

Almeida JA, Torrent J, Barrón V (2003) Cor do solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 27:985–1002.

Anda (2019) **Associação Nacional para Difusão de Adubos**. Disponível em: <<http://anda.org.br>>. Acesso em: 15 mar. 2019.

Anghinoni I, Salet RL (2000) Reaplicação de calcário no sistema plantio direto consolidado. In: Kaminski J. **Uso de corretivos de acidez do solo no sistema plantio direto**. Pelotas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, p.41-59.

Araújo LG, Sousa DMG. de; Figueiredo CC de, Rein TA (2015) Uso de gesso e sua influência na produtividade de cana-de-açúcar e atributos químicos de um Latossolo Vermelho do Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO **Resumos...** Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Bahia ASRS, Marques Jr J, La Scal NL, Cerri CEP, Camargo LA (2007) Prediction and mapping of soil attributes using diffuse reflectance spectroscopy and magnetic susceptibility. **Soil Science Society of America Journal** 81:1450-1462, 2017.

Bahia ASRS, Marques Jr J, Panosso AR, Camargo LA, Siqueira DS, La Scala Jr N (2014) Iron oxides as proxies for characterizing anisotropy in soil CO₂ emission in

sugarcane areas under green harvest. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam 192:152–162.

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

Barbieri DM (2007) **Formas do relevo e variabilidade espacial de atributos químicos e mineralógicos de um argissolo cultivado com cana-de-açúcar**. 83 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Unesp, Jaboticabal.

Barbosa RS (2014) **Erodibilidade de latossolos predita pela suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa**. 78f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Unesp, Jaboticabal.

Barrón V, Torrent J (1986) Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides on soil color. **Journal of Soil Science** 37:499-510.

Becegato VA, Ferreira FJF (2005) Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geofísica** 23:371-405.

Berg M van den, Oliveira JB (2000) Variability of apparently homogeneous soils in São Paulo State, Brazil: I. Spatial Analysis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 24:377-391.

Bhatti AU, Mulla DJ, Koehler FE, Gurmani AH (1991) Identifying and removing spatial correlation from yield experiments. **Soil Science Society American Journal** 55:1523-1528.

Bishop TFA, Lark RM (2006) The geostatistical analysis of experiments at the landscape-scale. **Geoderma** 133:87-106.

Bohnen H, Meurer EJ, Bissani CA (2000). Solos ácidos e solos afetados por sais. In: Meurer EJ (Eds.) **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Genesis, p.109-122.

Borgelt SC, Searcy SW, Stout BAA, Mulla DJ (1994). Spatially variable liming rates: a method for determination. **Transactions of the ASAE** 37:1499 – 1507.

Brasilagro (2019) **Companhia Brasileira de Propriedades Agrícolas**. Disponível em: <<http://www.brasil-agro.com/brasilagro2011>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

Brown DJ, Shepherd KD, Walsh MG, Mays MD, Reinsch TG (2006) Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, 132:273-290.

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

Burrough PA, Bouma J, Yates SR (1994) The state of the art in pedometrics. **Geoderma** 62:311- 326.

Caione G, Teixeira MTR, Lange A, Silva AF da, Fernandes FM (2001) Modos de aplicação e doses de fósforo em cana-de-açúcar forrageira cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista de Ciências Agro-Ambientais** 9:1-11.

Caires EF, Banzatto DA, Fonseca AF (2000) Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 24:161-169.

Camargo LA, Marques Jr J, Pereira GT, Alleoni L R F (2013a) 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 Jr J, Barrón V, Alleoni LRF, Barbosa RS, Pereira GT (2015) Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma** 251:124-132.

Camargo LA, Marques Jr J, Pereira GT, Alleoni LRF, Bahia ASR de S; Teixeira D de B (2016). Pedotransfer functions to assess adsorbed phosphate using iron oxide content and magnetic susceptibility in an Oxisol. **Soil Use and Management** 32:172-182.

Camargo MS, Korndörfer GH, Pereira HS (2007b) Solubilidade do silício em solos: influência do calcário e ácido silícico aplicados. **Bragantia** 66:637-647.

Cambardella C A, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE (1994) Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal** 58:1501-1511.

Campbell JB (1987) **Introduction to remote sensing**. New York: The Guilford Press, 551p.

Cantarella H, Rossetto R, Landell MGA, Bidóia MAP, Vasconcelos ACM (2002) Misturas em diferentes proporções de fosfato natural reativo e fosfato solúvel em água para a cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL. **Anais...** Piracicaba: STAB, p. 218-224.

Capurro ML (2004) **Manual de segurança**. 2.ed. São Paulo: USP. Instituto de Química, 56 p.

Conley DJ, Paerl HW, Howarth RW, Boesch DF, Seitzinger SP, Havens KE, Lancelot C, Likens GE (2009) Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. **Science** 323:1014-1015.

Cortez LA (2013) **Subsolagem em profundidade variada com base no mapeamento de áreas de manejo específico**. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Unesp, Jaboticabal.

Costa MMR (2017) **Caracterização do solo do planalto ocidental paulista por espectroscopia de fluorescência de raios x**. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Unesp, Jaboticabal.

Craik D (1995) **Magnetism, principles and applications**. Lisboa: John Wiley and Sons, 459 p.

Crusciol CAC, Gilioli BL, Silva RH, Rosolem CA (2003) Lixiviação de bases em função da adubação nitrogenada e da calagem superficial em plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. **Resumos...** Ribeirão Preto: SBCS.

David M (1970) The geostatistical estimation of porphyry-type deposits and scale factor problems. In: PRIBAM MINING CONGRESS. **Proceedings...** Praga, p.91-109.

Dearing JA, Hay KL, Baban SMK, Huddleston AS, Wellington EMH, Loveland PJ (1996) Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International** 127:728–734.

Dearing JA, Lees JA, White C (1995) Mineral magnetic properties of acid gleyed soils under oak and Corsican pine. **Geoderma** 68:309–319.

Dearing JA, Livingstone IP, Bateman MD, White K (2001) Palaeoclimate records from OIS 8.0–5.4 recorded in loess-palaeosol sequences on the Matmata Plateau, southern Tunisia, based on mineral magnetism and new luminescence dating. **Quaternary International** 76:43–56.

Defelipo BV, Braga JM, Spies C (1972) Comparação entre métodos de determinação da necessidade de calcário de solos de Minas Gerais. **Experientiae** 13:111-136.

Delhomme JP (1976) **Kriging in hydrosociences**. Fontainebleau: Centre D'Informatique Geologique, 94 p.

Demattê JLI (1986) Solos arenosos de baixa fertilidade: estratégia de manejo. In: SEMANA AGROINDUSTRIAL, 5, SEMANA “LUIZ DE QUEIROZ”. **Anais...** Piracicaba: USP/ESALQ.

Demattê JLI (2005) **Recuperação e manutenção da fertilidade dos solos**. Informações Agronômicas. Piracicaba, 24 p. (Encarte Técnico).

Deutsch CV, Journel AG (1998) **GSLIB**: geostatistical software library and user's guide. New York: Oxford University Press, 369 p.

Dobermann A, Ping JL (2004) Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. **Agronomy Journal** 96:85-297.

Earl R, Taylor JC, Wood GA, Bradley I, James LT, Waine T, Welsh JP, Godwin RJ, Knight SM (2003) Soil factors and their influence on within-field crop variability. Part I: Field observation of soil variation. **Biosystems Engineering** 4:425-440.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2015) **Manejo da adubação fosfatada para cana-de-açúcar no cerrado**. Brasília: Embrapa Cerrados. (Embrapa Cerrados. Circular Técnica 29).

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2015) **Recomendações para correção da acidez do solo para cana-de-açúcar no cerrado**. Brasília: Embrapa Cerrados. (Embrapa Cerrados. Comunicado Técnico 177).

EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997) **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 211 p.

Ernani PR, Nascimento JAL, Oliveira LC (1998) Increase of grain and green matter of corn by liming. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 22:275-280.

Eyre JK, Shaw J (1994) Magnetic enhancement of Chinese loess—the role of γ Fe_2O_3 , **Geophysical Journal International** 117:265–271.

Faroni CE, Donzelli JL, Forte JA, Penatti CP, Silva PC (2012) **Nutrição e adubação mineral de cana-de-açúcar – safra 11/12**. Piracicaba: Centro de Tecnologia Canavieira, 96 p. (Relatório Técnico de P & D).

Fernandes RBA, Barrón V, Torrent J, Fontes MPF (2004) Quantificação de óxidos de ferro de Latossolos brasileiros por Espectroscopia de Reflectância Difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28:245-257.

Ferreira DF (2008) **Estatística multivariada**. 1. ed., Lavras: Editora UFLA, 662 p.

Ferreira GB, Mattioni JAM, Smiderle OJ, Uchôa SCP, Melo VF (2007) **Recomendação de calagem pelo método do pH SMP para o Cerrado de Roraima**. Roraima: Embrapa. (Comunicado Técnico).

Figueiredo Filho CP (2002) Avaliação da adubação fosfatada da cana-de-açúcar com o hiperfosfato natural reativo. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS DO BRASIL. **Anais...** Recife: STAB, p. 259 – 263.

Fine P, Singe MJ, Verosub KL, Tenpas J (1993) New evidence for the origin of ferimagnetic minerals in loess from China, **Soil Science Society of America Journal** 57:1537–1542.

Fontes MPF, Oliveira TS, Costa LM, Campos AAG (200) Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma** 96:81-99.

Freitas L, Casagrande JC, Campos MCC, Silva LS (2015) Técnicas multivariadas na avaliação de atributos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes manejos. **Agrária. Recife Online** 10:17-26.

Gatiboni LC (2003) **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 247 f. Tese (Doutorado Agronomia) – UFSM, Santa Maria.

Gomes RP, Bergamim AC, Silva LS, Campos MCC, Filla VA, Nascimento MF, Souza ED, Cunha JM, Oliveira R, Oliveira IA (2018) Compaction and Physical Attributes of the Soil After the Development of Cover Plants. **Journal of Agricultural Science** 10:206-217.

Gonçalves GK, Meurer EJ, Bortolon L, Gonçalves DRN (2011) Relação entre óxidos de ferro e de manganês e a sorção de fósforo em solos no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 35:1633- 1639.

Grimley DA, Arruda NK, Bramstedt MW (2004) Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible and precise delineation of hydric soils in the midwestern USA. **Catena** 58:183–213.

Grimley DA, Vepraskas MJ (2000) Magnetic susceptibility for use in delineating hydric soils. **Soil Science Society of America Journal** 64:2174-2180.

Guzmán G, Barrón V, Gómez JA (2010) Evaluation of magnetic iron oxides as sediment tracers in water erosion experiments. **Catena** 82:126–133.

Hanesch M, Scholger R (2005) The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International** 161:50–56.

Hanesch M, Scholger R, Dekkers MJ (2001) The application of fuzzy c –means cluster analysis and non-linear mapping to a soil data set for the detection of polluted sites, **Physics and Chemistry of the Earth** 26:885–891.

Haynes RJ (1984) Lime and phosphate in the soil-plant system. **Advances in Agronomy** 37:249-315.

Heredia OS, Cirelli AF (2007) Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity. **Geoderma** 137:426-431.

Horta MC, Torrent J (2007) Phosphorus desorption kinetics in relation to phosphorus forms and sorption properties of Portuguese acid soils. **Soil Science** 172:631–638.

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

Jaisi DP, Blake RE; Kukkadapu RK (2010) Fractionation of oxygen isotopes in phosphate during its interactions with iron oxides. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 74:1309–1319.

Johnson RA, Wichern DW (2002) **Applied multivariate statistical analysis**, 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Johnson SE, Loeppert RH (2006) Role of organic acids in phosphate mobilization from iron oxide. **Soil Science Society of America Journal** 70:222–234.

Jong E, Pennock DJ, Nestor PA(2000) Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada. **Catena** 40:291-305.

Journel AG (1974). Geostatistical for conditional simulation of orebodies. **Economic Geology** 69:673-687.

Journel AG, Huijbregts CJ (1991) **Mining geostatistics**. 5.ed. London: Academic Press, 600 p.

Kämpf N, Curi N (2000) Óxidos de ferro: Indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: Novais RF, Alvarez VVH, Schaefer CEGR. (Eds.) **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, p. 107–138.

Khattree R, Naik DN (2000) **Multivariate data reduction and discrimination with SAS Software**. SAS Institute, Cary, NC.

Korndörfer GH (2004) Fósforo na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Eds.) **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, p. 290-306.

Legros JP (2006) **Mapping of the soil**. Enfield: Science Publisher.

Lima ASA, Silva IF, Santiago RD, Silva Neto LR, Souza C, Cavalcante FS (2006) Influência da adubação mineral sobre três cultivares de cana-de-açúcar na microrregião de Guarabira na Paraíba. **Agropecuária Técnica** 27:92-99.

Lopes AS (1999) Recomendações de calagem e adubação no sistema plantio direto. In Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez, V., V. H. (Eds.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, p. 93-98.

López LR (2009) **Pedologia quantitativa: espectrometria VIS-NIR-SWIR e mapeamento digital de solos**. 171 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – ESALQ, USP.

Luque ECL (2008) **Propiedades magnéticas de los óxidos de hierro en suelos mediterráneos**. 179 f. Tese (Doutorado) - Universidad de Córdoba, Córdoba.

Machado LO, Lana AMQ, Lana RMQ, Guimarães EC, Ferreira CV (2007) Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira Ciência Solo** 31:591-599.

Mahadevaiah MS, Kumar Y, Galil MSA, Suresha MS, Sathish MA, Nagendrappa G (2007) A simple spectrophotometric determination of phosphate in sugarcane juices, water and detergent samples. **E-Journal of Chemistry** 4:467-473.

Maher BA (1998) Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 137:25–54.

Maher BA, Alekseev A, Alekseeva T (2003) Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation, **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 201:321– 341.

Maher BA, Thompson R (1999) The magnetic record of palaeoclimate in the terrestrial loess and palaeosol sequences in Quaternary Climates. In: Maher BA, Thompson R (Eds.) **Environments and magnetism**. Cambridge: University Press, p. 81–125.

Malavolta E (1981) **Corretivos cálcicos, magnesianos e calco-magnesianos. Manual de química agrícola: adubos e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, p. 232-245.

Malavolta E (1987) Nutrição mineral das plantas. In: **Curso de atualização em fertilidade do solo**. Campinas: Fundação Cargill, p. 33-101.

Malavolta E (1991) **O gesso agrícola no ambiente e na nutrição da planta** - perguntas e respostas. In: SECITAP. **Anais...** Jaboticabal: FCAV, 29 p.

Malavolta E (2006) **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo, Agronômica Ceres, 638 p.

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

Marques Jr J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 113 f. Tese (Livre-Docência) – Unesp – Jaboticabal.

Mata JDV (1997) **Variabilidade espacial de indicadores da compactação de terra roxa estruturada, sob dois sistemas de preparo, cultivada com feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado**. 73 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – USP, Piracicaba.

Matheron G (1963) Principles of geostatistics. **Economic Geology** 58:1246-1266.

Matias SSR, Marques Jr J, 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, Minasny B, Cattle SR, Vervoor TRW (2002) From pedotranfer functions to soil inference systems. **Geoderma** 109:41-73.

Mcbratney AB, Webster R (1986) Choosing functions for semivariograms of soil properties and fitting them to sample estimates. **Journal Soil Science** 37:617-637.

Mcbratney AB, Webster R, McLaren RG, Spiers RB (1982) Regional variation of extractable copper and cobalt in the topsoil of southwest Scotland. **Agronomie** 2:969-982.

Mendonça MF, Araújo WP, Pereira Jr CC, Chaves LHG, Silva F de AFD da (2015) Preparo do solo e fosfatagem – II. Rendimento agrícola e industrial da cana-de-açúcar. **Agropecuária Científica no Semiárido** 11:14-21.

Meyer JH, Wood RA (2001) The effects of soil fertility and nutrition on sugarcane quality: a review. South African Sugar Technologists Association. **Mount Edgecombe** 75:242-245.

Mingoti AS (2005) **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Editora: UFMG; Belo Horizonte, Minas Gerais, 297 p.

Molin JP (2002) Desafios da agricultura brasileira a partir da agricultura de precisão. In: SIMPÓSIO SOBRE ROTAÇÃO SOJA/MILHO NO PLANTIO DIRETO. **Anais...** Piracicaba: Potafós, 2002.

Montanari R, Marques Jr J, Pereira GT, Souza ZM (2005) Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 40:69-77.

Morelli JL, Nelli EJ, Baptistela JR, Demattê JLI (1991) Termofosfato na produtividade da cana-de-açúcar e nas propriedades químicas de um solo arenoso de baixa fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 15:57-61.

Motta PEF, Curi N, Franzmeier DP (2002b) Relation of soils and geomorphic surfaces in the Brazilian Cerrado. In: Oliveira PS, Marquis RJ, eds. **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**. Chicago: Columbia University Press, p.13-32.

Motta PEF, Curi N, Siqueira JO, Raij B van, Furtini Neto AE, LIMA JM (2002) Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: influência da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 26:349-359.

Moura AB (2014) **Produtividade agrícola e industrial da cana-de-açúcar sob diferentes fontes e doses de fósforo**. 76 f. Dissertação (Mestrado - Produção Vegetal) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo.

Moura MVPF, Farias CH de A, Azevedo CAV de, Dantas Neto J, Azevedo HM de, Pordeus RV. Doses de adubação nitrogenada e potássica em cobertura na cultura da cana-de-açúcar, primeira soca, com e sem irrigação. **Ciência e Agrotecnologia** 29:753-760.

Mulla DJ, Batí AU, Hammond MW, Benson JAA (1992) Comparison of winter wheat yield and quality under uniform versus spatially variable fertilizer management. **Agriculture Ecosystems & Environment** 38:301-311.

Nolla A, Anghinoni I (2006) Critérios de calagem para a soja no sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 30:475-483.

Paolinelli MT (1986) **Gesso agrícola**. São Paulo: Petrobrás, 16 p. (Informe Técnico)

Parfitt RL (1978) Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy** 30:1-5.

Paz A, Taboada MT, Gómez MJ (1996) Spatial variability in topsoil micronutrients contents in one-hectare cropland plot. **Soil Science and Plant Analysis** 27:479-503.

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

Penatti CP (2013) **Adubação de cana-de-açúcar. 30 anos de experiências**. Itu: Ottoni Editora, 347 p.

Penatti CP, Forti JA (1994) Calcário e gesso em cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA. **Anais...** Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, p. 83-98.

Penatti CP, Forti JA, Coelho A, Donzelli JL (1997) **Calcário, silicato de cálcio e gesso na cana-de-açúcar**. Piracicaba: Copersucar, 12 p. (Relatório Parcial em Cana Planta).

Petrovsky E, Ellwood BB (1999) Magnetic monitoring of air, land, and waterpollution, in quaternary climates, In: Maher BA, Thompson R. (Eds.) **Quaternary climates, environments and magnetism**. Lancaster: Cambridge University Press.

Primavesi A (1979) **Manejo ecológico do solo**: a agricultura em regiões tropicais. 9.ed. São Paulo: Nobel, 549 p.

Quaggio JA (2000) **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas.

Quaggio JA, Dechen AR, Raij B van (1982a) Efeito da aplicação de calcário e gesso sobre a produção de amendoim e lixiviação de bases no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 6:189-194.

Raij B van (1991) **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres; Potafós, 343 p.

Raij B van (2004) Fósforo no solo e interação com outros elementos. In: Yamada T, Abdalla SRS. **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, p. 107-114.

Raij B van (2007) Uso do gesso na agricultura. **Informações Agronômicas** 117:14-15.

Raij B van (2011) **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 420 p.

Raij B van, Cantarela H, Quaggio JA, Furlani AMC (1996) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 285 p. (Boletim Técnico, 100).

Raij B van, Quaggio JA (2014) Methods used for diagnosis and correction of soil acidity in Brazil: An overview. In: Moniz, AC, Furlani AMC, Schafert, RE **Plant-Soil Interactions at low pH: Sustainable agriculture and forestry production**. Campinas: Brazilian Soil Science Society, p.205-214.

Raij BV (1981) **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto de Piracicaba: Instituto da Potassa & Fósforo; Instituto Internacional da Potassa, 142 p.

Rees LRD (Ed.) (1999) **Methods of soil analysis**. Part 5. Mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, 509 p.

Reichardt K, Vieira SR, Libardi PL (1986) Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 10:1-6.

Resende AV, Furtini Neto AE (2007) **Aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada em solos do Cerrado**, Planaltina: Embrapa Cerrado, 32 p.

Ribeiro AC, Guimaraes PTG, Alvarez VH (1999) **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: CFSEMG/UFV, 360 p.

Ritchey KD, Souza DMG, Lobato E, Correia O (1980) Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian savannah Oxisol. **Agronomy Journal** 72:40-44.

Rolim Neto FC, Schaefer CEER, 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 Paranaíba-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28:953-964.

Ronquim CC (2010) **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa, Monitoramento por Satélite, 26 p.

Rossetto R, Dias FF, Vitti AC (2008) Problemas nutricionais dos solos nas novas fronteiras canavieiras. **Revista Idea News** 8:78-90.

Royall D (2001) Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. **Catena** 46:15-34.

Russo D, Bresler E (1981) Soil hydraulic properties as sthochastic processes: I. An analysis of field spacial variability. **Soil Science Society of America Journal** 45: 687.

Salviano AAC, Vieira SR, Sparovek G (1988) Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* L. em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 22:115-122.

Salviano AAC, Vieira SR, Sparovek G (1995) Dependência espacial dos teores de macronutrientes da parte aérea da *Crotalaria juncea* em área de erosão acelerada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25:115-122.

Santos DH, Silva M, Tiritan CS, Foloni JSS, Echer FR (2011) Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 15:443–449.

Santos DH, Tiritan CS, Foloni JSS, Fabris LB (2010) Produtividade de cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 40:454-461.

Schachtschabel P, Blume HP, Brümmer G, Hartge KH, Schwertmann U, Lehrbuch der Bodenkunde (1998). **Lehrbuch der Bodenkunde**. 14th ed, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, p. 494. 1998.

Schaefer CEGR, Gilkes RJ, Fernandes RBA (2003) EDS/SEM study on microaggregates of Brazilian Latosols, in relation to P adsorption and clay fraction attributes. **Geoderma** 20:33.

Schwertmann U, Taylor RM (1989) Iron oxides, In: Dixon, J. B.; Weed, S. B. (Eds.) **Minerals in Soil Environments**. 2.ed. Madison: SSSA, p. 379–438.

Scott HD, Mauromoustakos A, Handayani IP, Miller DM (1994) Temporal variability of selected properties of loessial soil as affected by cropping. **Soil Science Society of America Journal** 58:1531-1538.

Silva AM (2006) Dinâmica da produtividade do setor de serviços no Brasil: uma abordagem microeconômica. In: De Negri JA, Kubota LC (Orgs.) **Estrutura e Dinâmica do Setor de Serviços no Brasil**. Brasília: IPEA, p. 73-105.

Silva LS (2016) **Mineralogia da fração argila dos solos do Planalto Ocidental Paulista**. 68 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Unesp, Jaboticabal.

Silva VR, Reichert JM, Reinert DJ (2004) Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural** 34:399- 406.

Silveira PM, Zimmermann FJP, Silva SC, Cunha AA (2000) Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 35:2057-2064.

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

Singer MJ, Fine P, Verosub KL, Chadwick OA (1992) Time dependence of magnetic susceptibility of soil chronosequences on the California coast. **Quaternary Research** 37:323–332.

Singer MJ, Verosub KL, Fine P, Tenpas JA (1996) conceptual model for the enhancement of magnetic susceptibility in soils. **Quaternary International** 34:243–248.

Siqueira DS (2010c) **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Unesp, Jaboticabal.

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

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

Siqueira DS, Marques Jr J, Pereira GT, Teixeira DDB, Vasconcellos V, Carvalho Jr O, Martins E (2015a) Detailed mapping unit design based on soil landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena** 135:149 -162.

Sousa DM, Lobato E (2004) **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 416 p.

Sousa DMG de, Lobato E, Rein TA (2006) Recomendação de adubação fosfatada com base na capacidade tampão de fósforo do solo para a região do Cerrado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS. **Resumos...** Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, p. 27.

Sousa DMG, Miranda LN, Lobato E, Castro LHR (1989) Métodos para determinar as necessidades de calagem em solos dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 13:193-198.

Sousa Júnior JÁ, Dematte JAM, Genú AM (2008) Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:727-738.

Souza CK, Marques Jr J, Martins Filho MV, Pereira GT (2003) Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal - SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 27:1067-1074.

Souza DMG de, Rein TA, Lobato E, Ritchey K (1992) Sugestões para diagnose e recomendações de gesso em solos de cerrado. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DE GESSO NA AGRICULTURA. **Anais...** Uberaba, 1992. p.139-158.

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.

Stone LF, Silveira PM (2001) Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25:395-401.

Tabor JA, Warrick AW, Pennington DA, Myers de (1984) Spatial variability of nitrate in irrigated cotton: I. Petioles. **Soil Science Society of America Journal** 48:602-607.

Teixeira DDB, Marques Júnior J, Siqueira DS, Vasconcellos V, Carvalho Jr O, Martins E, Pereira G (2018) Mapping units based on spatial uncertainty of magnetic susceptibility and clay content. **Catena** 164:79-87.

Theocharopoulos SP, Petrakis PV, Trikatsoula A (1997) Multivariate analysis of soil grid data as a soil classification and mapping tool: the case study of a homogeneous plain in Vagia, Viotia, Greece. **Geoderma** 77:63– 79.

Tittonell P, Shepherd KD, Vanlauwe B, Giller KE (2008) Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya - an application of classification and regression tree analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 123:137–150.

Torrent J, Barrón V (2008) Diffuse reflectance spectroscopy. In: Ulery AL, Drees LR. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Part 5. Mineralogical methods. Madison: Soil Science Society of America Journal. p. 367-368.

Trangmar BB, Yost RS, Uehara G (1985) Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy** 38:45-93.

Ulén B, Snäll S (2007) Forms and retention of phosphorus in an illite-clay soil profile with a history of fertilisation with pig manure and mineral fertilizers. **Geoderma** 137:455-465.

Upchurch DR, Edmonds WJ (1993) Statistical procedures for specific objectives. In: Mausbach, M.J., Wilding, L.P. **Spatial variabilities of soils and landforms**. Madison: Soil Science Society of America, 270 p.

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

Ventura Jr E, Nearing MA, Norton LD (2001) Developing a magnetic tracer to soil study erosion. **Catena** 43: 277–291.

Vieira SR (2000) Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais RF, Alvarez VVH, Schaefer CEGR., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo** 1:1-54.

Vieira SR, Hatfield JL, Nielsen DR, Biggar, JW (1983) Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia** 51:1-75.

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

Viscarra Rossel RA, Mcglynn RN, Mcbratney AB (2006) Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma** 137:70-82.

Viscarra-Rossel RA, Walvoort DJJ, Mcbratney AB, Janik L; Skjemstad JO (2006) Visible, near-infrared, mid-infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma** 131:59–75.

Vitti GC (1987) Acidez do Solo, Calagem e Gessagem, In: Fernandes, F. M.; Nascimento, V.M. **Curso de atualização em fertilidade do solo**. Campinas, Fundação Cargill, p.303-319.

Vitti GC, Luz PH de C, Malavolta E, Dias AS, Serrano CG de E (2008) **Uso do gesso em sistemas de produção agrícola**. Piracicaba: GAPE.

Webster R (2000) Is soil variation random? **Geoderma** 97:149- 163.

Weirich Neto PH, Sverzut CB, Schimandeiro A (2006) Necessidade de fertilizante e calcário em área sob sistema plantio direto considerando variabilidade espacial. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental** 10:338-343.

White K, Walden J (1997) The rate of iron oxide enrichment in arid zone alluvial fan soils, Tunisian southern atlas, measured by mineral magnetic techniques. **Catena** 30:215- 227.

Wiethölter S (2000) **Calagem no Brasil**. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 104 p.

Wiethölter S (2002) Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: CURSO DE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO. **Anais....** Guarapuava: Cooperativa Agrária, p. 14-53.

Wiethölter S (2002b) Revisão das recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. IN: REUNIÃO SUL BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 100 p.

Zambello Júnior E, Azeredo DF de. (1983) Adubação na região Centro-Sul. In: Orlando Filho, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba, IAA/PLANALSUCAR, p. 289-313.

CAPÍTULO 2 - ASSINATURA MAGNÉTICA E ESTIMAÇÃO DA CALAGEM, GESSAGEM E FOSFATAGEM CORRETIVA DO SOLO

Resumo - O objetivo neste trabalho foi utilizar a suscetibilidade magnética do solo para auxiliar nas recomendações e no mapeamento de áreas específicas de manejo para as aplicações de calagem, gessagem e fosfatagem corretiva do solo. Foram coletadas 89 amostras de solo em uma área de 443 ha, nas quais foram determinados os atributos químicos, os teores de argila e a suscetibilidade magnética do solo. Foram calculadas as recomendações de calagem, gessagem e fosfatagem para cada amostra. Os dados foram submetidos à análise estatística e aos componentes principais. Foram desenvolvidas, nos pontos estratificados, funções de pedotransferência utilizando modelos de regressão entre a suscetibilidade magnética do solo e os atributos estudados. A modelagem da dependência espacial foi feita com o uso da geoestatística e construídos os mapas de krigagem e variogramas cruzados para observar a correlação espacial entre a suscetibilidade magnética do solo e os atributos estudados. A suscetibilidade magnética do solo acompanhou, em mesmo sentido, o grupo discriminado pela fosfatagem e pela gessagem e apresentou correlação espacial linear negativa com a recomendação de calagem ($R = -0,84$), e positiva com gessagem ($R = 0,88$) e fosfatagem ($R = 0,93$). Desta forma, a suscetibilidade magnética do solo teve potencial para auxiliar nas recomendações de calagem, gessagem e fosfatagem, bem como na elaboração de mapas de áreas específicas para o manejo destas práticas.

Palavras-chave: geoestatística, zonas de manejo específico, pedometria

2.1 Introdução

Apesar da alta tolerância à acidez do solo, a cana-de-açúcar requer recomendações adequadas para a correção do solo com o intuito de otimizar a produtividade (Quaggio e Raij, 2008). O desenvolvimento da cana-de-açúcar na

ausência de correção do solo acarreta menor desenvolvimento do sistema radicular, ocasionando menor exploração do volume de solo e eficiência dos fertilizantes aplicados, bem como na menor exploração da água armazenada no perfil.

A prática utilizada para a correção da acidez do solo na superfície é a calagem, e a neutralização do alumínio fitotóxico em profundidade é gessagem. A fosfatagem corretiva do solo, apesar de pouco adotada nas usinas e pelos fornecedores de cana, visa elevar os níveis iniciais de fósforo antes da adubação fosfatada (Embrapa, 2015). Recomendações adequadas de calagem, gessagem e fosfatagem corretiva podem aumentar a produtividade em cana planta e gerar expectativas para que, com o efeito residual dessas aplicações, garanta o pleno desempenho das socas.

Para ocorrer os efeitos favoráveis das recomendações, visando à correção do solo, as dosagens devem estar em conformidade com os atributos físicos e químicos do solo. Estes por sua vez, apresentam variabilidade espacial que deve ser levado em consideração para recomendações das doses de forma adequada. (Lark e Minasny, 2018).

Cavalcante et al. (2007) destacam que a aplicação de fertilizantes e de corretivos, e o delineamento de pesquisas em campo, podem ser direcionados para um manejo mais adequado quando há o conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo. Estudos agronômicos envolvem um sistema complexo, pois há fatores do sistema solo-água-planta que atuam ao longo do tempo e imprimem uma variabilidade natural, que também é somada ao manejo realizado pelo homem, que acentua a variabilidade dos atributos do solo (Cavalcante et al., 2007).

As orientações técnicas para aplicar no campo as dosagens da maioria das recomendações se dão em função de argila. Muitos autores tem destacado o teor da argila para as práticas de manejo, dentro os quais: (i) ajustar recomendações de calagem, gessagem e fosfatagem corretiva do solo, (ii) decidir número de adubações nitrogenadas e potássicas; (iii) avaliar probabilidade de problemas com deficiência de micronutrientes; (iv) avaliar estresses hídricos e problemas com drenagem (Lopes e Guilherme, 2000; Sousa e Lobato, 2004; Alvarez et al., 1999). Neste sentido, o

mapeamento da variabilidade espacial do teor de argila pode nortear as práticas de áreas de manejo específico.

Uma característica intrínseca do solo é a variabilidade ou heterogeneidade espacial de suas propriedades (Jenny, 1941). A presença de variabilidade espacial dos nutrientes e atributos do solo é causada por fatores naturais e antrópicos. Cambardella e Karlen (1999) destacam que as condições de fertilidade ao longo das paisagens precisam ser conhecidas, analisadas e manejadas adequadamente para que os solos permaneçam ou se tornem produtivos.

Dentre as tecnologias usadas para conhecer a variabilidade espacial dos atributos do solo, pode-se destacar o uso e as técnicas da geoestatística, que se baseiam na teoria das variáveis regionalizadas (Goovaerts, 2001). Com a identificação de áreas com manejo específico, poder-se-ão adotar medidas de recomendações na quantidade e no local indicado, podendo contribuir na eficiência do uso das aplicações à correção do solo, ao aumento de produtividade e ao controle eficiente no impacto ambiental da agricultura (Mendonça et al., 2018).

A suscetibilidade magnética do solo (SM) tem-se mostrado como um procedimento que permite a quantificação indireta da argila e demais atributos de propriedades químicas, físicas e mineralógicas do solo por um procedimento analítico considerado limpo, simples, barato e acurado (Marques Júnior., 2014). As coletas das amostras no campo, as análises no laboratório e a avaliação quantitativa dos atributos do solo são etapas onerosas e intensas, mas que irão permitir o cálculo das dosagens das recomendações calagem, gessagem e fosfatagem corretiva do solo. Contudo, a suscetibilidade magnética do solo tem-se mostrado como um método alternativo de forma mais prática, menos onerosa e menos impactante ao ambiente (Ramos et al., 2018).

A suscetibilidade magnética do solo (SM) pode ser entendida como a medida de facilidade com que um material se magnetiza em presença de um campo magnético (Siqueira et al., 2015). Os materiais magnéticos dependem das concentrações e das características do mineral quanto à estrutura magnética do cristal, composição, tamanho, morfologia e domínio desses minerais na rocha ou no solo (Verosub e Robert,

1995) e permite correlações com os atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo em funções de pedotransferência (Mathé et al., 2006).

Muitos autores concluíram que a suscetibilidade magnética do solo é um bom preditor de atributos relacionados com a composição e a mineralogia dos Argisolos (Veresub e Roberts, 1995; Grimley e Vepraskas, 2000; Royal, 2001; Camargo et al., 2013; Bahia et al., 2017). Fontes et al. (2000) analisaram que solos com maior teor de argila, há formação de minerais de comportamento magnético mais evidente, o que mostra que a SM pode ser usada para inferir o teor de argila do solo. Os mesmos autores verificaram também que os tipos de classes de solos e os materiais de origem diferenciaram as leituras da SM.

A SM é um atributo covariativo dos fatores e dos processos de formação, e representa em muitos trabalhos uma alta acurácia na quantificação indireta dos atributos físicos, tais como argila, químicos, como a capacidade de troca catiônica (CTC), e mineralógica, como o teor de hematita (Maher e Thompson; 1999; Torrent e Barrón, 1993; Veresub e Roberts, 1995).

A SM é uma técnica alternativa que pode ser utilizada para auxiliar, ou até mesmo a substituir alguns métodos convencionais de análise do solo, que somada aos benefícios de ser uma técnica de fácil mensuração, menos onerosa e menos impactante ao ambiente pelo não uso de reagentes e não destrutiva ao solo torna-se muito atrativa para investigações que visam às recomendações de calagem, gessagem e fosfatagem corretiva do solo (Torrent et al., 2007; Siqueira et al., 2010b).

O mapeamento das variáveis do solo em larga escala se torna viável com o uso das funções de pedotransferência, já que estas funções são uma alternativa para redução de custos e de tempo, pois permite estimar atributos do solo por meio de modelos matemáticos a partir de outros atributos facilmente mensuráveis (McBratney et al., 2002). Neste sentido, a previsão de cenários e o planejamento de adubações com maior eficiência de custos financeiros e menos impacto ambiental podem ser avaliados com os mapas de atributos, e o emprego de funções de pedotransferência pode, por exemplo, possibilitar a predição de atributos do solo de difícil obtenção, como o fósforo (Lagacherie e Mcbratney, 2007).

A suscetibilidade magnética do solo como função de pedotransferência foi usada para entender a variabilidade espacial de atributos do solo para zoneamento específico em cana-de-açúcar, em regiões tropicais (Siqueira et al., 2015), para identificar áreas com potenciais para a adsorção do fósforo (Peluco et al., 2015) e para entender, por exemplo, regiões mais propensas à melhor qualidade do café (Carmo et al., 2016).

O objetivo neste trabalho foi utilizar a suscetibilidade magnética do solo para auxiliar nas recomendações e no mapeamento de áreas específicas de manejo para as aplicações de calagem, gessagem e fosfatagem corretiva do solo.

2.2 Material e Métodos

O estudo foi realizado em uma área comercial de 443 ha da Usina São Martinho, sob cultivo de cana-de-açúcar, a nordeste do Estado de São Paulo, município de Luiz Antônio. As coordenadas geográficas são -21°34'34,69" de latitude sul e -47°40'10,41" de longitude oeste. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo megatérmico, tropical com estação seca de inverno (Aw) e precipitação média de 1.400 mm, com chuvas concentradas no período de novembro a fevereiro. Esta área está inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista, próxima ao limite das Cuestas Basálticas, no divisor litoestratigráfico arenito-basáltico (Figura 1).

Na área de experimento foram verificadas três formações geológicas, sendo elas: formação Botucatu, Serra Geral e Depósito Colúvio Eluvionar (IPT, 1981), e os solos foram classificados, de acordo com o levantamento realizado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), como Latossolo Vermelho distroférico, textura argilosa, LVdf1.1; Latossolo Vermelho distrófico, textura média 1 ou média 1/argilosa, LVd2.4; Latossolo Vermelho distrófico, textura arenosa/média, LVd4.4; Latossolo Vermelho distrófico, textura média, LVd3.4; Latossolo Vermelho distrófico, textura argilosa, LVd1.1; Latossolo Vermelho distroférico, textura argilosa, LVdf1.4; e Neossolo Quartzarênico órtico distrófico, textura arenosa, RQod4.1, sob cultivo de cana-de-açúcar, com colheita mecanizada.

Para a realização das análises granulométricas, análises químicas e da suscetibilidade magnética do solo, foram coletadas 89 amostras nas camadas de 0,00 – 0,20 m e 0,20 – 0,40 m, em uma malha amostral de 1 ponto a cada 5 ha. Com a observação prévia da área quanto à geologia, pedologia e mapa de suscetibilidade magnética do solo, foram coletadas mais 14 amostras estratificadas (representativas dos compartimentos) nas mesmas profundidades das anteriores, com o intuito de representar em menos pontos amostrados a área geral do estudo (Figura 1a).

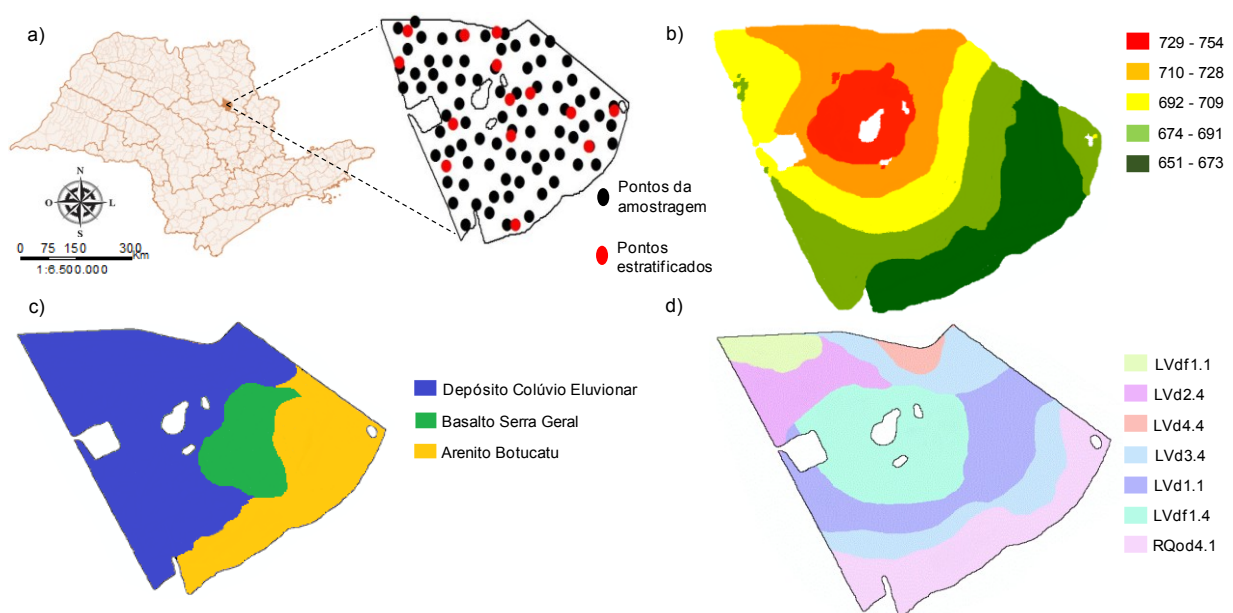


Figura 1. Localização da área de estudo em área de 443 ha. a- Município de Luís Antônio (São Paulo) e malha amostral; b- Altitude (m); c – Geologia; d – classes de solo. LVdf, Latossolo Vermelho distroférico; LVd, Latossolo Vermelho distrófico; RQod, Neossolo Quartzarênico

As amostras foram secas e passadas em peneira de 2 mm de abertura de malha para a determinação dos atributos químicos do solo (pH, Ca, Mg, K, e H + Al) e da capacidade de troca catiônica (CTC), de acordo com Raij et al. (2001). A granulometria do solo foi determinada de acordo com a Embrapa (2011), e a avaliação da suscetibilidade magnética do solo (SM) foi determinada na TFSA (terra fina seca ao ar)

por um medidor de suscetibilidade MS2 (Bartington Instruments Ltd., Oxford, Inglaterra), acoplado a um sensor de laboratório MS2B de duas frequências, conforme metodologia descrita por Dearing (1999).

De acordo com a fórmula proposta pela Embrapa Cerrados para aplicação de calagem, gessagem e fosfatagem (Comunicado Técnico 177 e Circular Técnica 29, Embrapa Cerrados, 2015), procedeu-se ao cálculo para as recomendações em todos os pontos da amostragem, a partir da saturação por bases ($V\%$), capacidade de troca catiônica (CTC), teor de argila (g kg^{-1}) e teor de fósforo na resina (mg dm^{-3}), de acordo com as medições feitas na safra de 2017/2018. Assim, utilizou-se a equação dose (t ha^{-1}) para recomendações de calagem = $[(V_2 - V_1) \times T \times f] / 100$; em que T é a capacidade de troca catiônica em cmolc dm^{-3} a pH 7; f é o fator de correção para a qualidade do calcário, definida por $f = 100 / \text{PRNT}$ (Poder Relativo de Neutralização Total); $V_2 = 60\%$ se pH (CaCl_2) $< 5,2$ ou $5,5$ em Neossolos; $V_2 = 70\%$ em solos de textura arenosa ou média e com CTC $< 4 \text{ cmolc dm}^{-3}$; caso contrário, corrigir para $V_2 = 50\%$.

A gessagem foi feita com gesso agrícola úmido (DG), com 15% de enxofre, sendo DG (kg ha^{-1}) = $75 \times \text{teor de argila } (\%)$. O critério para a recomendação de gesso é quando m , saturação por alumínio em %, é $> 20\%$ e/ou $\text{Ca} < 0,5 \text{ cmolc dm}^{-3}$. Ao dissolver em água o gesso irá infiltrar-se no solo e ficará retido em camadas de 0,80 a 1,00 m de profundidade.

A aplicação de gesso ocorre em área de reforma, podendo estender-se a aplicação parcelada em duas ou até três parcelas, para cana com longevidade de 6 anos. Caso as análises químicas do solo não tenham $m \% > 20\%$ e/ou $\text{Ca} < 0,5 \text{ cmolc dm}^{-3}$, o comunicado técnico 177 da Embrapa Cerrados (2015) considera também como critério $V\% < 50\%$ na profundidade de 0,20 a 0,40 m, e a dosagem continua DG = $75 \times \text{teor de argila } (\%)$.

Se o teor de fósforo atual estiver abaixo de 20 mg dm^{-3} pelo método de extrator da resina, além da adubação fosfatada de plantio, deve-se realizar a fosfatagem corretiva do solo, de modo que a recomendação P_2O_5 (kg ha^{-1}) seja: $[\text{teor desejado de fósforo} - \text{teor atual}] \times \text{capacidade tampão de P no solo}$.

Tabela 1. Fosfatagem Corretiva

Textura	Argila	Capacidade Tampão de P do solo	
		Resina	Mehlich -1
	%	(kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅)	[mg dm ⁻³ P solo]
Arenosa	≤15	6	5
Média	16 - 35	9	9
Argilosa	36 - 60	14	30
Muito argilosa	>60	19	70

Adaptado de Souza et al., (2006)

Para efeito de comparação com as recomendações da Embrapa (2015), avaliou-se também as recomendações de calagem do Boletim Técnico N^o 100 do IAC e Copersucar, gessagem pelas recomendações do Boletim Técnico N^o 100 do IAC, Demattê (1986) e Vitti et al (2008), e fosfatagem pela recomendação de Vitti e Mazza (2002).

O boletim Técnico N^o 100 do IAC recomenda necessidade de calcário (NC) na camada 0,00 - 0,20m para chegar à saturação de bases (V₂) a 60% seguindo a equação: $NC = [(60 - V_1) \times T \times f] / 100$; em que T é a capacidade de troca catiônica em cmol_cdm⁻³ a pH 7; f é o fator de correção para a qualidade do calcário, definida por $f = 100 / PRNT$ (Poder Relativo de Neutralização Total).

Visando a elevação de cálcio e magnésio em solos muito arenosos, como CTC menor que 5,5 cmol_cdm⁻³, e com baixos teores de cálcio e magnésio (<3 cmol_cdm⁻³), deve-se aplicar a equação da Copersucar para necessidade de calagem $NC = [3 - (Ca + Mg)] \times 100 / PRNT$, em que Ca – teor de cálcio na análise do solo na camada de 0,00 – 0,20 ou 0,00 – 0,25m, em cmol_cdm⁻³; Mg – teor de magnésio na análise do solo na camada de 0,00 – 0,20 ou 0,00 – 0,25m, em cmol_cdm⁻³; PRNT – Poder Relativo de Neutralização Total ; e a necessidade de calcário (NC) para solos argilosos (CTC>5,5 cmol_cdm⁻³) deve-se utilizar $NC = [(60 - V_1) \times T \times f] / 100$.

A recomendação de gessagem pelo boletim Técnico N^o 100 do IAC deve ser utilizado quando as amostras de solo na camada 0,20 – 0,40m apresentarem as seguintes condições: teor de cálcio no solo menor que 4 cmol_cdm⁻³, ou Al(m%) maior

que 40% ou Alumínio (Al^{3+}) maior que $0,5 \text{ cmol}_c\text{dm}^{-3}$, sendo a necessidade de gesso (NG) = argila (g kg^{-1}) x 6.

A necessidade de gessagem pela recomendação de Vitti et al (2008) acontece quando: teor de cálcio $< 0,5 \text{ cmol}_c\text{dm}^{-3}$ ou $\text{Al}^{3+} > 0,5 \text{ cmol}_c\text{dm}^{-3}$ ou $m > 30\%$ ou $V < 35\%$, e a recomendação pela seguinte equação: $\text{NG} = (50 - V_1) \times \text{CTC}/500$, em que NG é a necessidade de gesso agrícola em t ha^{-1} , V_1 – saturação por bases atual do solo na camada 0,20 – 0,40m, e CTC – capacidade de troca catiônica de cátions ($\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$) do solo na camada de 0,20 – 0,40m. Também pode recomendar a aplicação de gesso de acordo com a Tabela 2 (Demattê, 1986; citado por Demattê, 2005).

Tabela 2. Quantidade aproximada de gesso agrícola a ser aplicada de acordo com a capacidade de troca catiônica (CTC) e a saturação por bases (V) do subsolo.

CTC ($\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$)	V(%)	Dose de gesso (t ha^{-1})
<30	<10	2,0
	10 - 20	1,5
	20 - 35	1,0
30 - 60	<10	3,0
	10 - 20	2,0
	20 - 35	1,5
60 - 100	<10	3,5
	10 - 20	3,0
	20 - 35	2,5

De acordo com a tabela 2, deve-se recomendar gesso no caso de solos com CTC máximo de $10 \text{ cmol}_c\text{dm}^{-3}$.

Para fosfatagem corretiva de acordo com a recomendação de Vitti e Mazza (2002), deve-se avaliar na camada 0,00 – 0,20m se o Presina é menor que 15 mg dm^{-3} e se o CTC é $6 \text{ cmol}_c\text{dm}^{-3}$ ou teor de argila $< 30\%$. Nessas condições aplicar 5kg de P_2O_5 para cada 1% de argila.

Os dados foram submetidos à análise de estatística descritiva para a obtenção da média, mediana, coeficiente de variação, valores de máximos e mínimos, assimetria, curtose e normalidade dos dados, pelo teste de Kolmogorov – Smirnov com o uso do software Minitab 13.1 (Minitab, State College, PA, EUA). Foi feita a análise de

componentes principais para os atributos físicos, químicos, suscetibilidade magnética do solo, e das recomendações de calagem, gessagem e fosfatagem corretiva do solo.

A análise de componentes principais (ACP) foi aplicada para buscar condensar a informação relevante em um conjunto menor de variáveis latentes ortogonais, que são os componentes principais (autovetores) gerados por combinações lineares das propriedades estudadas (Mingoti, 2005; Ferreira, 2008). Os dados foram padronizados ($\mu = 0$, $\sigma = 1$) e, em seguida, foram gerados os componentes principais, considerando os dois primeiros (CP1 e CP2) (Hair et al., 2009). Foram utilizados para a interpretação valores de correlação maiores do que 0,5 em valor absoluto. Essa correlação é uma medida do poder discriminatório da variável em questão, no respectivo Componente Principal. As análises foram realizadas pelo pacote estatístico Statistica 7.0 (Statistica, 2005).

A suscetibilidade magnética do solo (SM) foi utilizada como componente da função de pedotransferência na quantificação indireta dos atributos físicos e químicos dos solos e das recomendações de adubação e correção do solo. Assim, foram feitas as regressões de SM com a argila, fósforo da resina, pH, capacidade de troca catiônica, V%, e das recomendações de calagem, gessagem, e fosfatagem. Os modelos de regressão foram construídos a partir dos pontos estratificados ($n=14$) que foram observados com a sobreposição dos mapas geológicos, pedológicos e da suscetibilidade magnética do solo.

Em conformidade com as recomendações do comunicado técnico 177 da Embrapa Cerrados (2015), foram construídos mapas de calagem, gessagem e fosfatagem, e confrontados com os mapas destas mesmas recomendações estimadas pela suscetibilidade magnética do solo. A análise da dependência espacial dos atributos do solo foi feita por meio de geoestatística (Vieira et al., 1983), com uso de variogramas modelados com o programa GS+ (Geostatistics for environmental sciences, Robertson, 1998), e os modelos matemáticos foram ajustados aos variogramas experimentais, a partir dos quais foi determinado o grau de dependência espacial de cada atributo estudado.

Os valores interpolados por meio da krigagem foram usados para a construção de mapas, por meio do programa Surfer 7.0 (Golden Software, New York, EUA). As correlações foram avaliadas por meio de variogramas cruzados. Os variogramas experimentais foram escolhidos com base no número de pares envolvidos nos cálculos da semivariância dos primeiros lags, na presença de patamar definido e no valor do R^2 , para o modelo ajustado de validação cruzada.

2.3 Resultados e Discussão

A maior dosagem média de calcário foi à metodologia proposta pela Copersucar (Tabela 3). Entre a metodologia proposta pela Embrapa (2015) e Boletim Técnico N° 100 do IAC não houve diferenças significativas nas dosagens médias de calcário (Tabela 3). Estes resultados podem estar relacionados aos critérios de recomendações de calagem para cana-de-açúcar, sendo da Copersucar baseada pelo critério do cálcio e magnésio, enquanto ao do IAC pelo critério de recomendação da saturação por bases.

Tabela 3. Comparativo de dosagens entre as diferentes recomendações de calagem e fosfatagem

Calagem	Dosagem Média (t ha^{-1})	Desvio Padrão (t ha^{-1})
Embrapa (2015)	0,62b	0,22
Copersucar	1,06a	0,46
Boletim Técnico N° 100 IAC	0,62b	0,29
Fosfatagem	Dosagem Média (kg ha^{-1})	Desvio Padrão (kg ha^{-1})
Embrapa (2015)	98,65a	32,62
Vitti e Mazza (2002)	94,72a	31,65

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

O critério do cálcio e magnésio utilizado pela Copersucar recomenda mais necessidade de calcário em solos arenosos ($\text{CTC} < 5,5 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) do que em solos mais argilosos ($\text{CTC} > 5,5 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) (Gráfico 1). No entanto, as doses de calcário pelo

critério do Boletim Técnico N° 100 do IAC e da Embrapa (2015) são maiores em solos argilosos e menores em solos arenosos.

As recomendações de fosfatagem pela Embrapa (2015) e Vitti e Mazza (2002) apresentaram médias que não se diferenciam estatisticamente entre si, sendo, respectivamente 98,65 e 94,72 kg ha⁻¹. Ambos os métodos de fosfatagem requerem recomendações maiores à medida que aumenta a CTC do solo (Gráfico 1). Embora tenham diferenças quanto aos critérios usados pelas recomendações, as metodologias propostas pela Embrapa (2015) acompanham as recomendações de calagem do boletim técnico N° 100 do IAC e de fosfatagem corretiva do Vitti e Mazza (2002) (Gráfico 1).

Para gessagem, entretanto, não foi possível avaliar comparações, posto que a área em estudo não apresentou necessidade de aplicar gesso agrícola pelos critérios propostos pelo Boletim Técnico N° 100 do IAC, Demattê (1986), e Vitti et al (2008).

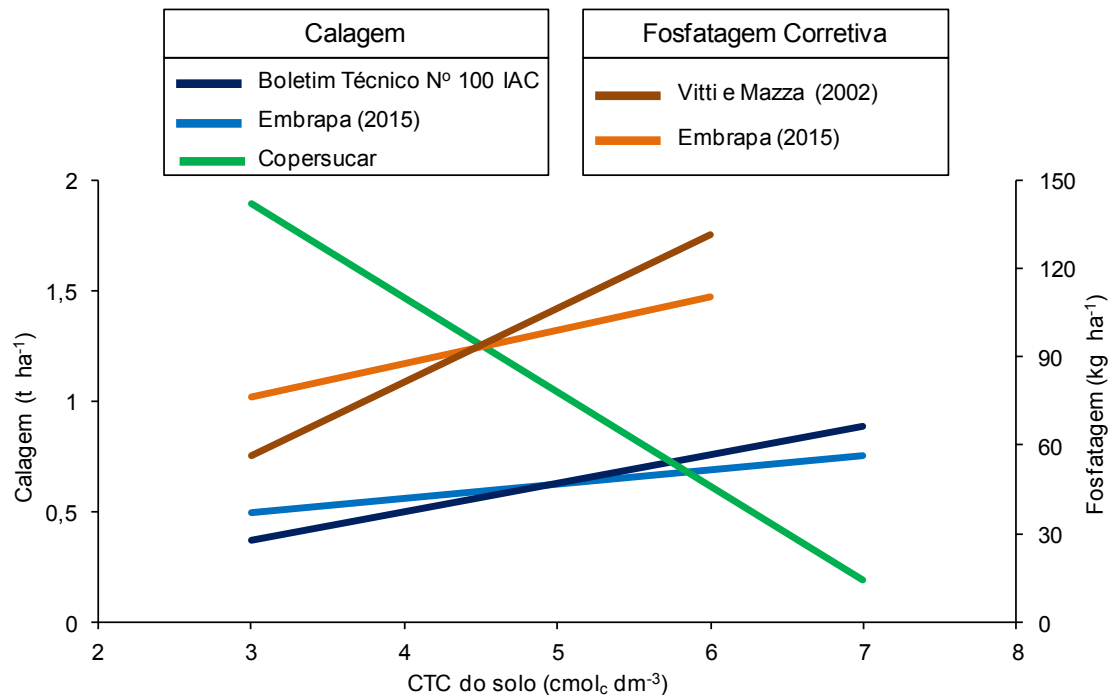


Gráfico 1. Comparação das diferentes recomendações em relação aos gastos de calcário e fosfatagem na presente área de estudo.

Os valores da média e da mediana para todos os atributos estão próximos, mostrando distribuição simétrica, com exceção para suscetibilidade magnética do solo, argila, gessagem e fosfatagem corretiva (Tabela 4). Dentre os atributos estudados, a SM e o teor de argila apresentaram grandes amplitudes dos dados. Tal comportamento pode estar relacionado à variação dos materiais de origem dos solos, que está inserida em um divisor litoestratigráfico de diferentes geologias. Segundo Warrick e Nielsen (1980), em se tratando de dados obtidos na natureza, o ajuste a uma distribuição teórica é apenas aproximado.

Tabela 4. Estatística descritiva para as variáveis suscetibilidade magnética do solo, argila, fósforo resina, pH, capacidade de troca catiônica e saturação por bases das amostras coletadas nos pontos da malha de amostragem (1)

Atributos do solo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Assimetria	Curtose	CV ⁽¹⁾ (%)	p
SM ($10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$)	19,70	13,05	0,54	57,00	0,62	-0,97	90,12	<0,01
Argila (g kg^{-1})	267,70	239,00	76,00	642,00	0,65	-0,58	54,58	<0,01
Presina (mg dm^{-3})	9,75	9,00	5,00	23,00	1,30	2,26	39,34	<0,01
pH (CaCl_2)	5,19	5,10	4,70	5,90	0,49	-0,72	6,26	<0,01
CTC ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	4,94	5,10	2,71	6,64	-0,43	-1,00	23,87	<0,01
V (%)	52,81	51,87	39,79	71,94	0,82	0,28	15,04	<0,01
Recomendação ⁽²⁾	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Assimetria	Curtose	CV ⁽¹⁾ (%)	p
Calagem (t ha^{-1})	0,62	0,68	0,00	1,92	0,19	-0,83	79,35	<0,01
Gessagem (kg ha^{-1})	952,39	0,00	0,00	4492	1,13	-0,07	139,85	<0,01
Fosfatagem(kg ha^{-1})	98,65	90,00	6,00	210,00	0,40	0,02	45,11	<0,01

N = 89; SM, suscetibilidade magnética do solo em baixa frequência; P, fósforo; CTC, capacidade de troca catiônica; V, saturação por bases; p, significância do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov; ⁽¹⁾CV, Coeficiente de Variação; ⁽²⁾recomendação de acordo com o método da Embrapa (2015).

As médias e medianas para as recomendações estão próximas, com exceção da gessagem, e variam de 0 a $1,92 \text{ t ha}^{-1}$ para calagem, 0 a 4492 kg ha^{-1} para gessagem e 6 a 210 kg ha^{-1} para fosfatagem. Os critérios das aplicações são analisados pelos atributos químicos e em função da argila, o que pode ocasionar em áreas que não receberam aplicações de corretivos e adubação. Luchesi et al (2001) destacam que solos com alto teores de argila ou de matéria orgânica, tem maior efeito tampão, isto porque os pontos de troca nos coloides orgânicos e minerais funcionam como receptor

de H^+ fazendo com que o pH não tenha grandes alterações. Desta forma, os efeitos da calagem, em profundidade, são menores em solos argilosos quando comparado com o os efeitos da calagem em profundidade em solos arenosos.

Os resultados referentes ao teste de Kolmogorov – Smirnov para todos os atributos avaliados indicam ausência de normalidade, e, com exceção do fósforo, todos os atributos apresentam valores de assimetria e curtose próximos de zero. Apesar de a normalidade dos dados não ser uma exigência da geoestatística, é conveniente que a distribuição não apresente valores extremos, o que poderia comprometer as estimativas de krigagem, posto que são baseadas nos valores médios (Issaks e Srivastava, 1989). O fato do fósforo da resina apresentar valores de assimetria e curtose mais distantes de zero, e um alto valor de CV, pode estar relacionado à dinâmica deste nutriente no solo e ao manejo realizado na área que proporcionou áreas mais propensas a disponibilidade deste nutriente a planta.

De acordo com a classificação de Warrick e Nielsen (1980), que compara a heterogeneidade dos dados, o pH enquadra-se na classe de baixa variabilidade ($CV \leq 12\%$), CTC e V% na classe de moderada variabilidade ($12\% < CV \leq 24\%$), enquanto que os demais atributos, na classe de alta variabilidade ($CV > 24\%$). Fontes et al. (2000) mostraram a variação da SM dos solos em função de diferentes materiais de origem. O teor de argila geralmente é um atributo que apresenta baixo ou médio CV, devido a maior dificuldade de ocorrerem alterações na granulometria dos solos, porém neste trabalho a argila apresentou um alto CV, fato que está relacionado à grande variação das classes de solo na área experimental.

Os atributos pH (Figura 2c) e V% (Figura 2e) nos pontos estratificados correlacionaram-se negativamente com a suscetibilidade magnética do solo. A relação R^2 da SM com os demais atributos variou de 0,12 a 0,97, com as melhores indicadores para argila e gessagem ($R^2=0,92$), e os piores para pH ($R^2=0,12$) e P resina ($R^2=0,31$). Observou, assim, que a SM acusou forte associação positiva com os teores de argila e a recomendação de gessagem. Resende et al. (1988) e Fontes et al. (2000) destacam que a alta expressão magnética da argila está associada aos tipos de materiais geológicos. Solos com maior fração argila favorecem a formação de minerais de

comportamento magnético mais evidente (maghemita), o que não acontece em solos com baixa concentração de argila.

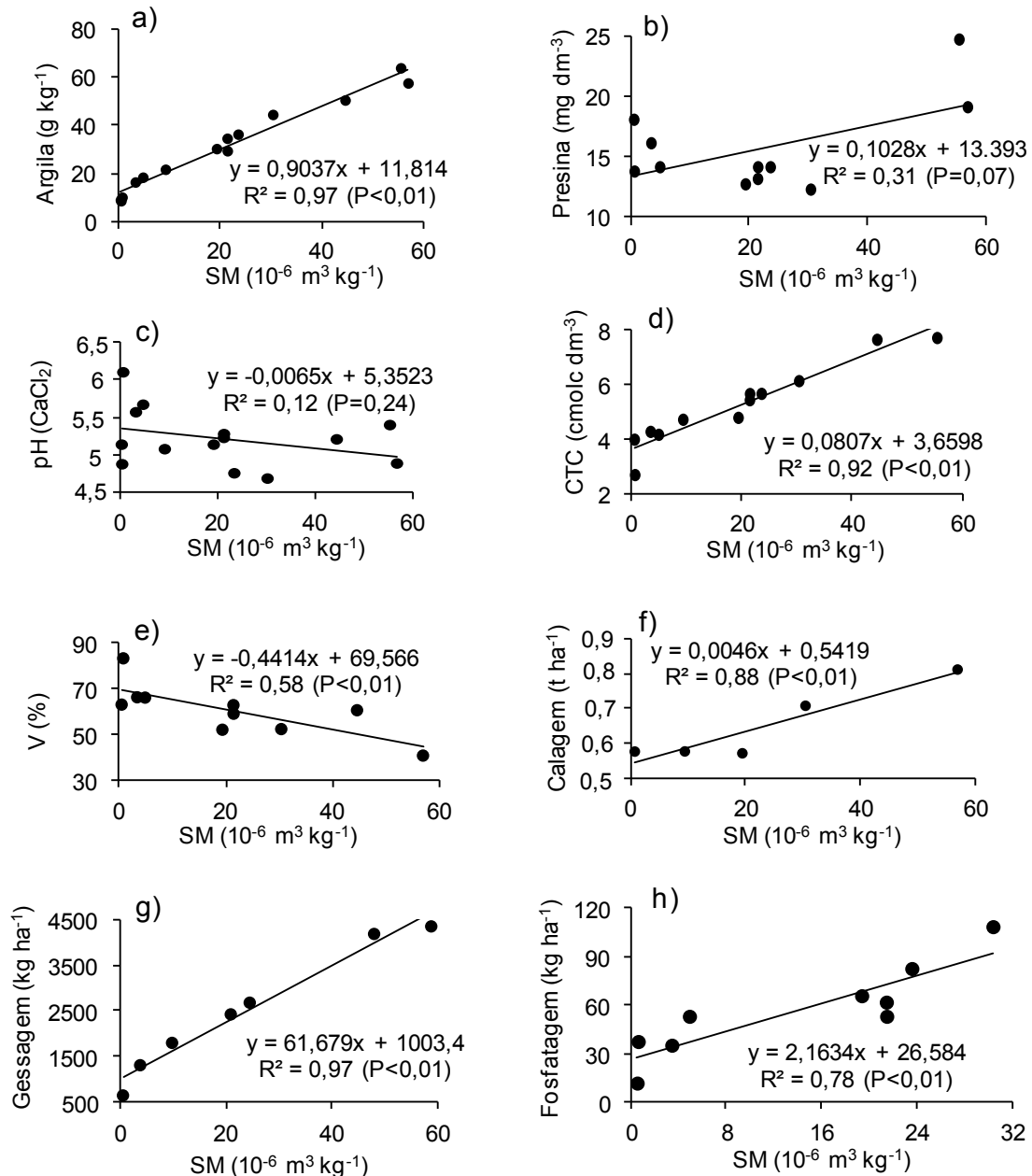


Figura 2. Modelos de regressão entre a suscetibilidade magnética do solo (SM) e os atributos do solo avaliados: a, argila; b, fósforo; c, pH; d, capacidade de troca catiônica (CTC); e, saturação por bases (V%); f, calagem (t ha⁻¹); g, gessagem (kg ha⁻¹); h, fosfatagem (kg ha⁻¹). Modelos na profundidade de 0,00 – 0,20 m, com exceção da gessagem, na profundidade 0,20 – 0,40m. Suscetibilidade magnética do solo (SM).

A suscetibilidade magnética do solo também correlacionou-se positivamente com a CTC e as recomendações de calagem e fosfatagem nas amostras estratificadas como registradas, respectivamente, nas Figuras 2a, 2b, 2d, 2f, 2g e 2h. Correlações positivas da suscetibilidade magnética do solo com CTC e argila foram também encontradas por Siqueira et al. (2015), quando observaram o potencial da suscetibilidade magnética do solo em avaliar atributos físicos e químicos do solo.

Tais fatos demonstram que a SM, quando analisadas nos pontos estratificados, podem ser utilizada como função de pedotransferência na quantificação indireta das recomendações de calagem, gessagem e fosfatagem corretiva do solo (Figura 2). Porém, segundo Campos et al. (2012a), Zawadzki et al. (2012) e Matias et al. (2013), a interpretação feita somente com base nos resultados da análise univariada pode causar falsas impressões, dificultando ainda mais a compreensão da relação pedologia-geomorfologia.

As análises multivariadas dos atributos com os componentes principais CP1 e CP2 foram encontradas para todos os pontos da amostragem (Tabela 5). Os atributos com correlações de mesmo sinal agem de forma direta, e sinais contrários, de forma inversa. Em CP1, têm-se: fósforo, pH e V% agindo de forma direta, com sinais negativos, e SM, calagem, gessagem, fosfatagem, argila e CTC, com sinais positivos. Em CP2, apenas a calagem apresentou sinal positivo.

Considerando os valores de correlação maiores do que 0,5 em valor absoluto, pode-se observar que calagem e gessagem estão em contraste com pH e V%, e em CP2 há uma ação conjunta de SM e fosfatagem. Neste sentido, o primeiro componente principal e, por ordem de importância, as propriedades que apresentaram maiores coeficientes de correlação, foram pH (-0,80), gessagem (0,72), calagem (0,70) e V% (-0,64). No segundo componente principal e por ordem de importância, têm-se as variáveis SM (-0,82), fosfatagem (-0,60) e V%(-0,59).

Em CP2, a SM foi o maior coeficiente de correlação que explicou a variação dos resultados. O fato desta situação pode ser explicada em decorrência da SM seguir a variação de argila e óxidos de ferro na área de estudo. Buscando quantificar e analisar a composição química das amostras de solo com as características magnéticas e

mineralógicas de solos ricos em Fe, desenvolvidos em substrato basáltico, Van Dam (2008) observou que o grau de desenvolvimento do solo é acompanhado por um aumento gradual no teor de Fe dos solos.

Tabela 5. Correlação dos componentes principais (CP)

Atributos	CP1	CP2
SM	0,30	-0,82
Calagem	0,70	0,32
Gessagem	0,72	-0,02
Fosfatagem	0,42	-0,60
Argila	0,48	-0,42
P	-0,03	-0,37
pH	-0,80	-0,41
CTC	0,56	-0,42
V%	-0,64	-0,59

SM: suscetibilidade magnética do solo; P: fósforo residual; CTC: capacidade de troca catiônica.

A ACP busca encontrar aquelas variáveis correlacionadas a cada autovetor (componentes principais), o que explica melhor as correlações entre elas. Vários autores têm utilizado a suscetibilidade magnética do solo como indicadora das condições ambientais do solo, sendo indicada em estudos sobre gênese e classificação de solos (Fabris et al., 1998; Fontes et al., 2000; Boyko et al., 2004).

A análise do componente principal permitiu visualizar as variáveis que mais discriminam as geologias, classificadas até o segundo nível categórico (Figura 3). Observa-se a formação de grupos geológicos, com suas respectivas características pedoambientais. A componente principal (CP1) está representando mais os solos da formação basáltica, caracterizada positivamente pelos atributos argila, CTC, fosfatagem e SM, já a CP2 representa os solos para a formação geológica do Arenito Botucatu.

Pelas CP 1 e CP 2 observa-se distribuição das amostras de solo, no plano bidimensional, classificadas segundo as formações geológicas de origem dos solos estudados. Há separação pela ACP entre a maioria das amostras de solo de origem

basáltica, que acompanha a SM e as recomendações de gessagem e fosfatagem, onde também são direcionados os vetores da argila, e CTC.

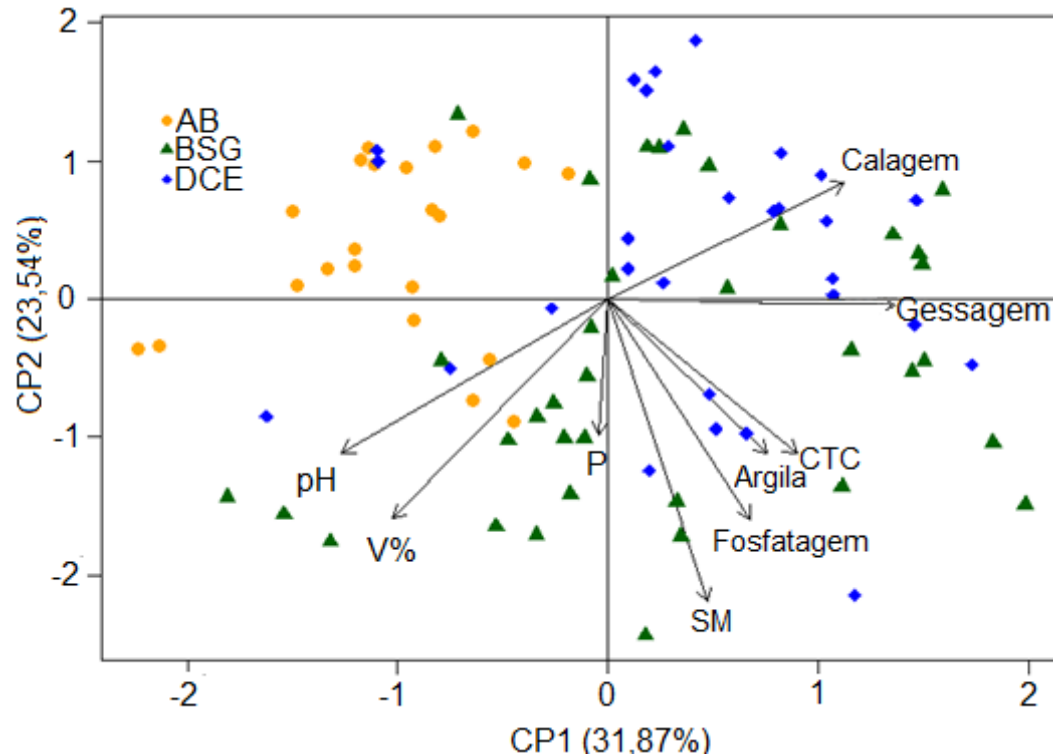


Figura 3. Gráfico de dispersão de escores dos componentes principais CP1 e CP2: formação geológica Arenito Botucatu (AB), Basalto Serra Geral (BSG), e Depósito Colúvio Eluvionar (DCE), saturação de bases (V%), fósforo (P), suscetibilidade magnética do solo (SM), capacidade de troca catiônica (CTC).

As técnicas de estatística multivariada levam em consideração a totalidade das variáveis, já que cada variável depende da outra, e as informações fornecidas se constroem não individualmente, mas pelo conjunto (Cruz et al., 2011). A análise de componentes principais (ACP) mostram que o componente principal 1 (CP1) explica 31,87 % da variância total dos atributos dos solos estudados, enquanto o CP2 explicou apenas 23,54% (Figura 3). De acordo com Kaiser (1958), foram consideradas somente as variáveis com autovalores acima de um, pois são aquelas que geram componentes com quantidade relevante de informação das variáveis originais.

A caracterização dos solos utilizando a análise de componente principal refletiu os diferentes materiais de origem e as mudanças pela ação do intemperismo ao longo do tempo. Resultados similares, utilizando a ACP para evidenciar relações entre a formação e a diferenciação dos solos em estudos de geologia, pedologia, e geomorfologia, foram obtidos por Campo et al. (2012); Vasconcelos et al. (2013); Silva (2016) e Costa (2017).

A SM representa estar no mesmo grupo discriminado pela argila, fosfatagem e gessagem, mantendo correlação positiva com a CP1, componente que melhor explica a variação do sistema. Contudo, a SM está em correlação negativa com a CP2, que está sendo mais bem representada pela calagem (Figura 3). Relações entre argila e minerais ferromagnesianos foram também encontrado por Machado et al. (2005) na formação Serra Geral, isto porque solos originados de rochas vulcânicas dão alta resposta magnética.

Os resultados indicam que há formação de grupos com as análises das variáveis, e assim, como em trabalhos semelhantes aos de Campos et al. (2012), a SM é uma técnica que permite agrupar variáveis com características semelhantes entre si e com aumento de variabilidade entre os agrupamentos formados.

A análise do comportamento e da distribuição da SM pode ser útil para distinguir a influência do material de origem, sendo possível investigar onde os volumes de solo com elevada SM situam-se no perfil e desse modo como caracterizar o solo para recomendar as aplicações de corretivos e adubos (Zawadzki et al., 2012). Neste sentido, alguns autores têm destacado que as separações dos ambientes permitem melhor planejamento agrícola (Sanzhez et al., 2012; Matias et al., 2015)

Na Tabela 6 é possível observar que as recomendações estimadas pela SM com o uso das funções de pedotransferência (Figura 2) apresentaram diferenças estatísticas entre as classes de solo, com exceção da gessagem (Tabela 6). Destaca-se que as recomendações de gessagem foram baseadas nas análises químicas do solo na profundidade de 20 – 40 cm, mas que devido aos critérios de recomendação em muitas amostras coletadas não se observou a necessidade de dosagens de gesso agrícola. Contudo, quando há separação por classes de solo pode-se observar que os maiores

teores da suscetibilidade magnética do solo ocorreram em áreas mais argilosas, oriundas do basalto, com maiores teores de ferro.

Tabela 6. Média dos atributos avaliados por classes de solo⁽¹⁾

Classe de solo ⁽²⁾	Área (ha)	SM ⁽³⁾ ---(10 ⁻⁶ m ³ kg ⁻¹)---	SM ⁽⁴⁾	Calagem Calculada / SM ⁽³⁾ ----(t ha ⁻¹)----	Gessagem Calculada / SM ⁽⁴⁾ ----- (kg ha ⁻¹)-----	Fosfatagem Calculada / SM ⁽³⁾
LVdf1.4	105	38,82a	39,63a	0,51ab / 0,36ab	1387a / 1403a	133a / 113a
LVdf1.1	18	24,44ab	25,70ab	0,89ab / 0,65ab	2185a / 2078a	102ab / 79ab
LVd2.4	45	23,63ab	21,37b	0,96a / 0,65ab	750a / 832a	124ab / 67b
LVd1.1	94	21,63b	22,32b	0,66ab / 0,66a	723a / 1167a	100ab / 71b
LVd3.4	89	16,71b	17,72b	0,39ab / 0,27b	590a / 735a	75b / 55b
RQod4.1	84	2,78b	2,85b	0,35b / 0,43ab	126a / 151a	82b / 33b
LVd4.4	8	1,78b	1,78b	0,93ab / 0,55ab	962a / 1113a	56b / 30b
Média	443	21,10	21,48	0,56 / 0,46	807 / 945	101 / 70

⁽¹⁾Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

⁽²⁾LVdf, Latossolo Vermelho distrófico; LVd, Latossolo Vermelho distrófico; RQod, Neossolo Quartzarênico. SM, suscetibilidade magnética do solo na profundidade de ⁽³⁾ 0,00-0,20m, ⁽⁴⁾0,20-0,40m. Calagem, Gessagem e Fosfatagem calculadas pelo Comunicado Técnico 177 da Embrapa Cerrados (2015) e estimada de acordo com a SM; Média, refere-se à média ponderada pela área.

O maior valor de recomendação de calagem foi observado no solo LVd2.4, e o menor valor, no solo RQod4.1. Solos argilosos também apresentaram as maiores recomendações de fosfatagem, e solos com textura arenosa, como os de menores recomendações. Barbieri et al. (2009) confirmam que o padrão de variabilidade dos minerais da fração argila nos limites da pedoforma coincidem com a correlação de importantes atributos agrônômicos como o fósforo.

Solos férricos (LVdf1.4, LVdf1.1) que possuem maiores teores de argila, CTC, e SM apresentaram potencial a receber as maiores recomendações de gessagem e fosfatagem corretiva. Tais valores estão de acordo com o recomendado pelo comunicado técnico 177 da Embrapa Cerrados (2015) que sugere maiores dosagens de gesso agrícola e fosfatagem em áreas com maiores teores de argila.

Segundo Camargo et al. (2015) , a suscetibilidade magnética complementa a caracterização dos minerais da fração argila e a resposta magnética dos sedimentos e dos solos está determinada, predominantemente, pelos minerais magnetita e/ou

maghemita. Como as recomendações das adubações e corretivos estão em função da argila, a SM mostra ser capaz de auxiliar nas estimações destas aplicações.

A dose média ponderada pela área, para as recomendações de calagem e fosfatagem calculada pelo método da Embrapa (2015), foi, respectivamente, 21,74% e 44,29% maior que as recomendações estimadas pela suscetibilidade magnética do solo (Tabela 6). Isso reflete que o mapeamento das áreas que receberão diferentes dosagens de gesso e fosfatagem corretiva pode ser melhores racionalizadas com o uso da técnica da suscetibilidade magnética do solo, uma vez que esta técnica consegue sinalizar áreas que receberão maiores ou menores dosagens de gesso e fosfatagem.

As médias ponderadas por classes de solos, com exceção da fosfatagem, encontram-se próximas quando comparado às recomendações da Embrapa (2015) e das estimadas de acordo com a suscetibilidade magnética do solo. Estes resultados indicam que a suscetibilidade magnética do solo como função de pedotransferência ajuda no entendimento das variações dos atributos do solo, que, por sua vez, auxilia a aumentar a racionalidade das recomendações para correção de solo.

De acordo com Legros (2006), a geologia e as formas de paisagem, entre outros fatores, condicionam a variabilidade do solo, sendo que mesmo dentro da mesma classe de solo há variabilidade (Teixeira et al., 2018). Como há variabilidade dos solos na área experimental, as recomendações, tanto as estimadas pela SM quanto as recomendadas pelo método da Embrapa, podem levar a aplicações com doses mais baixas em alguns locais, ou com doses elevadas em outros locais, aumentando o risco de contaminação ambiental e desbalanço nutricional.

Entre as técnicas para conhecer a variabilidade espacial do solo, a geoestatística destaca-se na área da ciência agrárias e pode auxiliar na melhor compreensão dos atributos do solo, favorecendo ambientes específicos de manejo (Tesfahunegn et al., 2011). Todos os atributos avaliados da análise geoestatística apresentam dependência espacial, e o modelo esférico foi o que melhor ajustou a estrutura da variabilidade espacial dos dados (Tabela 7).

Observou-se que o alcance dos semivariogramas, com exceção da gessagem, foi próximo aos observados para suscetibilidade magnética do solo. Estes dados

sinalizam a ideia que a SM auxilia nos levantamentos de solo (Teixeira et al., 2018). Marques Jr (2009) e Siqueira (2010) também encontraram valores semelhantes de alcance de variogramas dos atributos físicos e químicos de Latossolos e da SM.

Tabela 7. Geoestatística dos atributos avaliados do solo

Parâmetro	Modelo	C ₀	C ₀ + C ₁	A	GDE	R ²
Argila (g kg ⁻¹)	Esférico	10	20650	976	0,05	0,98
Presina (mg dm ⁻³)	Esférico	2,53	16,59	730	15,25	0,97
pH (CaCl ₂)	Esférico	0,0001	0,0775	778	0,13	0,95
CTC (cmolc dm ⁻³)	Esférico	0,001	1,299	1186	0,08	0,97
V (%)	Esférico	13,7	46,15	1427	29,69	0,95
Calagem (t ha ⁻¹)	Esférico	0,0042	0,2424	636	1,73	0,98
Calagem estimada ⁽¹⁾ (t ha ⁻¹)	Esférico	0,10 10 ⁻⁶	0,0073	865	0,14	0,79
Gessagem (kg ha ⁻¹)	Esférico	1000	1498000	493	0,07	0,86
Gessagem estimada ⁽¹⁾ (kg ha ⁻¹)	Esférico	1000	884000	907	0,11	0,82
Fosfatagem (kg ha ⁻¹)	Esférico	1,00	1867	761	0,05	0,82
Fosfatagem estimada ⁽¹⁾ (kg ha ⁻¹)	Esférico	1,00	1564	1071	0,06	0,96
SM (10 ⁻⁶ m ³ kg ⁻¹)	Esférico	8,70	324,4	909	2,68	0,95

C₀ – efeito pepita; C₀ + C₁ – patamar; GDE – grau de dependência espacial $[C_0/(C_0 + C_1)] \times 100$, A – alcance; R² – coeficiente de determinação do modelo ajustado; ⁽¹⁾estimado – recomendação estimada de acordo com a suscetibilidade magnética do solo (SM); MO – teor de matéria orgânica, P – fósforo da resina; SB – soma de bases; CTC – capacidade de troca catiônica.

De acordo com Cambardella et al. (1994) quando a análise da relação C₀/ (C₀ + C₁) for menor ou igual a 25%, a dependência espacial é considerada forte; entre 25 a 75%, média; e maior que 75%, fraca. Para argila, fósforo, pH, CTC e recomendações de calagem, gessagem e fosfatagem a relação C₀/ (C₀ + C₁) mostrou que esses atributos apresentaram forte grau de dependência espacial, enquanto V% apresentou dependência espacial moderada (Tabela 7).

Para os mapas de krigagem (Figuras 4 e 5) e de variogramas cruzados dos atributos estudados em função da suscetibilidade magnética do solo (Figura 6), foi possível avaliar a variabilidade dos atributos e a existência de correlação espacial. Peluco et al. (2015) observaram que a SM tem potencial para auxiliar no mapeamento e na identificação de áreas com diferentes potenciais à aplicação de vinhaça.

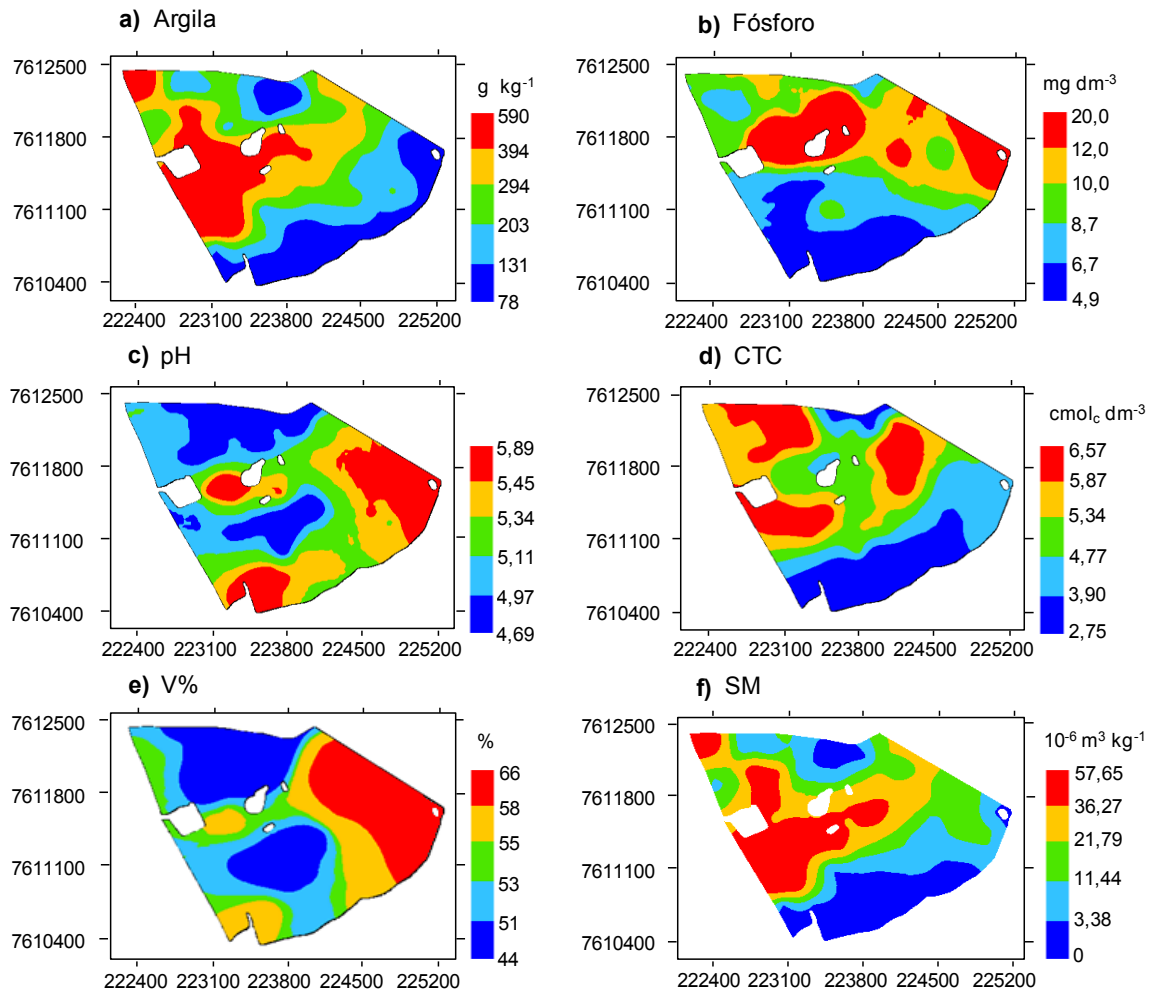


Figura 4. Mapas de krigagem dos atributos do solo. d, capacidade de troca catiônica (CTC); e, saturação por bases (V%); f, suscetibilidade magnética do solo (SM).

Os maiores valores de fósforo e CTC coincidem com áreas de maiores valores de suscetibilidade magnética do solo. Nas análises dos mapas, também é possível constatar que os maiores valores de pH e V% coincidem com os menores valores da suscetibilidade magnética do solo. Como todos estes atributos são utilizados no cálculo das recomendações, seu comportamento espacial pode influenciar diretamente nos mapas de recomendações para a correção do solo.

As isolinhas dos mapas da argila (Figura 4a) coincidem com as do mapa da suscetibilidade magnética do solo (Figura 4f). Esses resultados são semelhantes aos

obtidos por Siqueira et al. (2015), que observaram correlações positivas da suscetibilidade magnética do solo com as da argila. A avaliação do sentido das isolinhas das classes de variabilidade ajuda a compreender as relações de causa e efeito entre relevo e atributos químicos do solo (Leão et al., 2011).

Sabe-se que a determinação da argila, fósforo, CTC, pH e V% são determinadas em análises convencionais que demandam reagentes, tornando o processo mais oneroso, e mais impactante ao ambiente, ao contrario da técnica da SM que apenas usa a terra fina seca ao ar. Deste modo, estes resultados nos motivam a investir nos mapeamento da SM para prever atributos em uma forma mais viável. Além disso, observando os mapas dos atributos estudados (Figura 4), pode-se concluir que a assinatura magnética pode ser utilizada para separar solos de baixos a altos teores de argila, e também indicar as áreas que iram receber mais ou menos dosagens de corretivos e adubação.

A variabilidade espacial entre os mapas de krigagem das recomendações obtida pelo cálculo da Embrapa (2015) (Figuras 5a, 5c e 5e) encontra-se similar com às recomendações estimadas de acordo com a suscetibilidade magnética do solo (Figuras 5b, 5d e 5f). Estes resultados permitem verificar similaridades do padrão espacial das doses recomendadas pela Embrapa com as estimadas pela SM. Regiões da área experimental com maiores teores de SM coincidem com áreas com potencial a receber maiores doses de gessagem e fosfatagem, e menores dosagens de calagem.

De acordo com os valores médios ponderados pela área das doses recomendadas de calagem ($0,57 \text{ t ha}^{-1}$), de calagem estimada pela SM ($0,63 \text{ t ha}^{-1}$), de gessagem (782 kg ha^{-1}), de fosfatagem (100 kg ha^{-1}) e de fosfatagem estimada pela SM (66 kg ha^{-1}), calculados para os mapas de krigagem (Figura 5), verificam-se menores doses ou proximidades de valores com as recomendações por classes de solo (Tabela 6).

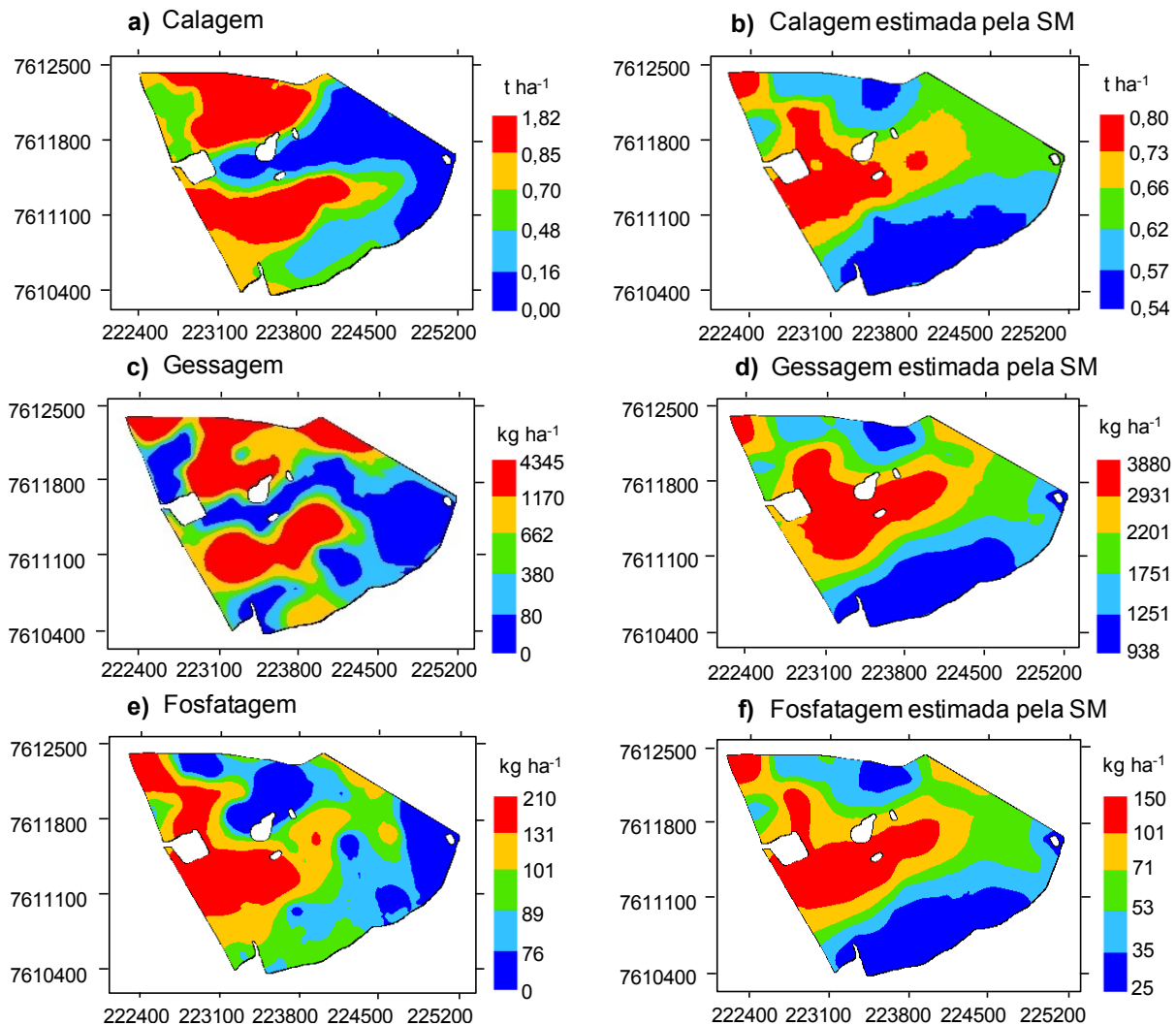


Figura 5. Mapas de krigagem das recomendações de calagem, gessagem e fosfatagem corretiva do solo. SM, suscetibilidade magnética do solo.

Outro aspecto que se destaca é que a SM conseguiu separar as áreas de acordo com o tipo de solo, mesmo com os de baixo teores de argila (RQod) (Tabela 6), assim como aconteceu também em estudos de predição de atributos com o uso da SM conduzidos por Bahia et al. (2017). Isto se torna possível visto a SM estar relacionada com as formas de ferro do solo, e se tornando assim um importante identificador de áreas homogêneas. A maior diferença entre os valores foi para o valor médio ponderado pela área da gessagem estimada pela SM (2071 kg ha⁻¹) e a calculada por classe de solo (945 kg ha⁻¹) (Figura 5).

Os variogramas cruzados indicam correlação espacial positiva da suscetibilidade magnética do solo com argila, fósforo, CTC, gessagem e fosfatagem, respectivamente (Figuras 6a, 6c, 6d, 6g e 6h), e negativa com a gessagem (Figura 6e)

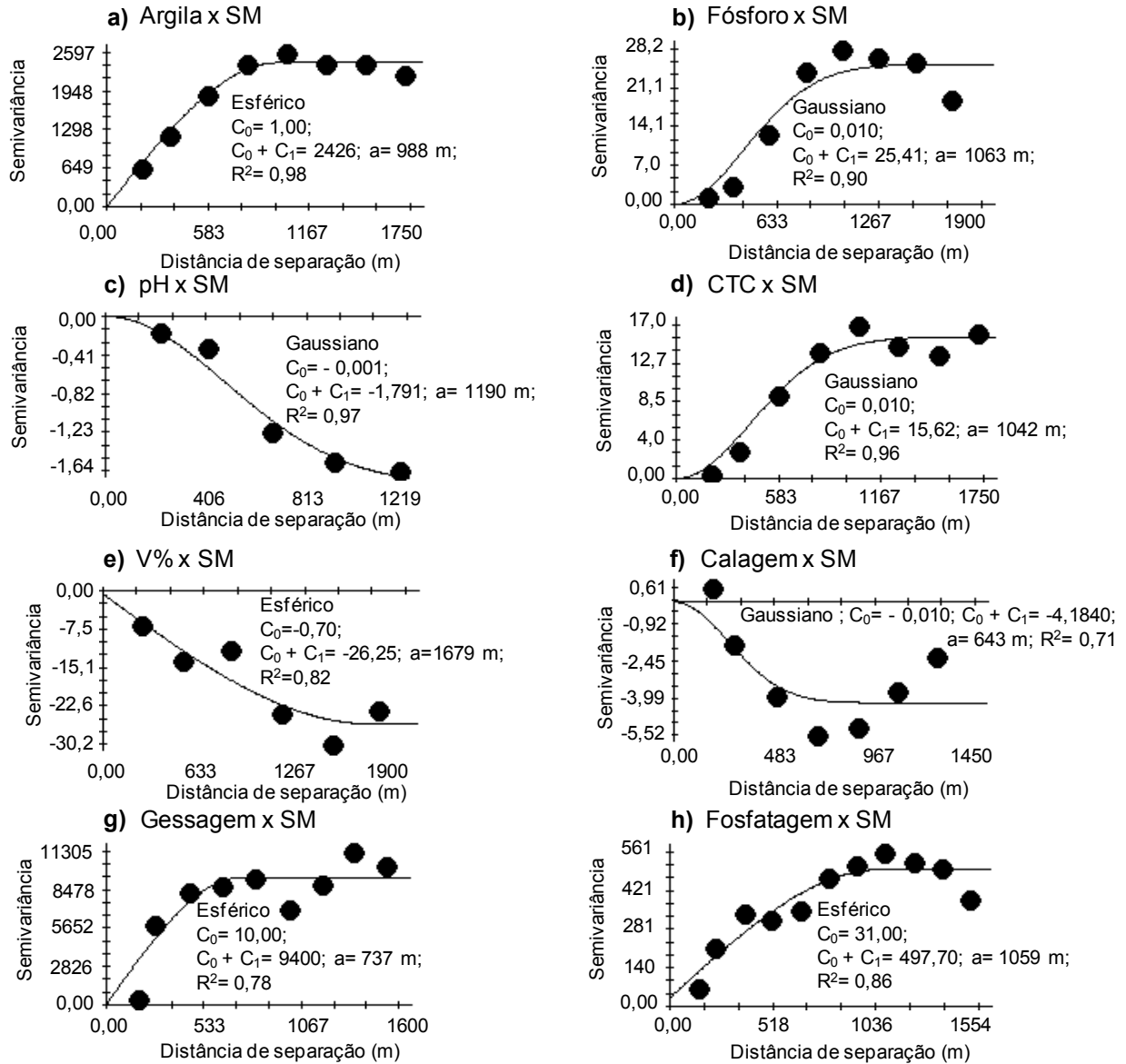


Figura 6. Variogramas cruzados dos atributos do solo em função da suscetibilidade magnética do solo (SM).

Correlação espacial negativa foi encontrada com suscetibilidade magnética do solo, pH (Figura 6b), V% (Figura 6e) e calagem (Figura 6f). Uma vez que os mapas de krigagem representam melhor a variabilidade do solo do que as recomendações avaliadas por classes de solo, as médias podem criar chances de superestimação ou de subestimação nas dosagens e não favorecer a racionalidade das aplicações.

Com a análise de recomendações usando técnicas indiretas menos intrusivas, mais práticas e menos impactantes ao ambiente, como a suscetibilidade magnética do solo, podem-se diminuir as maiores ou menores estimações de dosagens e priorizar a racionalidade das recomendações, de modo a priorizar as dosagens no local indicado e na quantidade adequada com respeito às restrições impostas pelos atributos do solo.

As recomendações propostas pela Embrapa (2015), para correção, condicionamento e fosfatagem corretiva do solo, mostram-se efetivas, porém a densidade amostral sugerida não consegue captar todas as variações que ocorrem no campo. Com o mapeamento da variabilidade espacial dos atributos estudados, como a suscetibilidade magnética do solo, há melhor representação real da área, o que pode resultar em recomendações mais racionalizadas para as dosagens de calagem, gessagem e fosfatagem corretiva do solo.

2.4 Conclusões

1. A suscetibilidade magnética do solo pode ser utilizada como componente da função de pedotransferência na quantificação indireta das recomendações de calagem, gessagem e fosfatagem para correção do solo.
2. A suscetibilidade magnética do solo pode ser utilizada para mapear áreas específicas de manejo para aplicação de calagem, gessagem e fosfatagem, com baixo custo monetário e ambiental.

2.5 Referências

Alvarez VVH, Novais RF, Barros NF, Cantarutti RB, Lopes AS (1999) Interpretação dos resultados das análises de solos. In: Ribeiro AC, Guimarães PTG, Alvarez VVH, (Eds.) **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5º Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, p.25-32.

Bahia ASRS, Marques Jr J, La Scala N, Cerri, CEP, Camargo, LA (2017) Prediction and mapping of soil attributes using diffuse reflectance spectroscopy and magnetic susceptibility. **Soil Science Society of America Journal** 81:1450-1462.

Benedini MS **Novo conceito no uso de calcário em cana-de-açúcar**, Copersucar, Série Agronômica, n° 16, 1ª edição, 1988. 19p.

RAIJ Bvan, Cantarela H, Quaggio JA, Furlani AMC (1996) **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**, 2.ed., Campinas, SP, Boletim Técnico N° 100 2ª edição Instituto Agronômico & Fundação IAC, 285p.

Boyko T, Scholger R, Stanjek H, Team M (2004). Topsoil magnetic susceptibility mapping as a tool for pollution monitoring: repeatability of in situ measurements. **Journal of Applied Geophysics** 55:249-259.

Camargo LA, Marques Jr 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.

Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE

(1994) Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal** 58:1501-1511.

Campos MCC, Marques Jr J, Souza ZM, Siqueira DS, Pereira GT (2012) Discrimination of geomorphic surfaces with multivariate analysis of soil attributes in sandstone - basalt lithosequence. **Revista Ciência Agronômica** 43:429-38.

Campos MCC, Ribeiro MR, Souza Júnior VS, Ribeiro Filho MR, Almeida MC (2012) Relações solo-superfície geomórfica em uma topossequência várzea-terra firme na região de Humaitá (AM). **Revista Brasileira Ciência do Solo** 36:325-36.

Campos MCCC, Santos LAC, Silva DMP, Mantovanelli BC, Soares MDR (2012) Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Agro@mbiente On-line** 6:102-109.

Carmo DAB, Marques Jr J, Siqueira DS, Bahia ASRS, Santos HM, Pollo GZ (2016) Cor do solo na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualidade de café. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51:1261-1271.

Cavalcante LF, Santos GD, Oliveira FA, Cavalcante ÍHL, Gondim SC, Beckman-Cavalcante MZB (2007) Crescimento e produção do maracujazeiro-amarelo em solo de baixa fertilidade tratado com biofertilizantes líquidos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** 2:15-19.

Cruz JS, Assis Jr RN, Matias SSR, Camacho-Tamayo JH (2011) Spatial variability of an Alfisol cultivated with sugarcane. **Ciencia e investigación agrária** 38:155-164.

Dearing JA (1999) **Environmental magnetic susceptibility**: using the Bartington MS2 system. 2nd ed. Kenilworth: Chi Publishing, 54 p.

Demattê JLI (1986) **Solos de baixa fertilidade: estratégia de manejo**. In: Semana agroindustrial, 5.; Semana “Luiz de Queiroz”, 29., Piracicaba. Anais...Piracicaba (mimeografado).

Demattê JLI (2005) **Recuperação e manutenção da fertilidade dos solos**. Informações Agronômicas, Piracicaba, n.111, 24p. (Encarte Técnico).

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2011) **Manual de métodos de análise do solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 230 p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2015) **Recomendações para correção da acidez do solo para cana-de-açúcar no cerrado**. Brasília: Embrapa Cerrados. (Embrapa Cerrados. Comunicado Técnico 177).

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2015) **Manejo da adubação fosfatada para cana-de-açúcar no cerrado**. Brasília: Embrapa Cerrados. (Embrapa Cerrados. Circular Técnica 29).

Goovaerts P (2001) Geostatistical modeling of uncertainty in soil science. **Geoderma** 103:3-36.

Fabris JD, Coey JMD, Mussel WN (1998) Magnetic soils from mafic lithodomains in Brazil. **Hyperfine Interactions** 113:249-258.

Ferreira DF(2008) **Estatística multivariada**. 1. ed., Lavras: Editora UFLA, 662 p.

Fontes MPF, Oliveira TS, Costa LM, Campos AAG (2000) Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma** 96:81–99.

Grimley DA, Vepraskas MJ (2000) Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. **Soil Science Society of America Journal** 64:2174-2180.

Hair Junior JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE, Tatham RL (2009) **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, p. 688.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1981). **Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000**. São Paulo: IPT.

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

Jenny H (1941) **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. Toronto: Dover Publications. 281 p.

Lagacherie P, Mcbratney AB (2007) Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. In: Lagacherie P, Mcbratney AB, Voltz M (Ed.) **Digital soil mapping: An introductory perspective**. Amsterdam: Elsevier, p.3-24.

Leão MGA, Marques Jr J, 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.

Legros JP (2006) **Mapping of the soil**. Enfield: Science Publisher.

Lopes AS, Guilherme LRS (2000) **Uso de fertilizantes e corretivos agrícolas: aspectos agronômicos**. São Paulo: Anda. 69 p.

Luchese EB, Favero LOB, Lenzi E (2001) **Fundamentos de química do solo**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 182 p.

Marques Jr J (2009) **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 113 f. Tese (Livre-Docência) – Unesp, Jaboticabal.

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

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** 58:202-217.

Matias SSR, Marques Jr J, 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 Jr J, 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, Minasny B, Cattle SR, Vervoort RW (2002) From pedotranfer functions to soil inference systems. **Geoderma** 109:41-73.

Mendonça PG, Teixeira DB, Moitinho MR, Silva Junior JF, Oliveira IR, Martins Filho MV, Marques Junior J, Pereira GT (2018) Temporal and spatial uncertainty of erosion soil loss from an Argisol under sugarcane management scenarios. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 42:1-15.

Mingoti AS (2005) **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Editora: UFMG; Belo Horizonte, Minas Gerais, 297 p.

Minitab Release (2000) Making Data Analysis Easier: version 13.1.models. In: Courtillot V (Ed.) **Comptes rendus geoscience**. Amsterdam, p. 1121-1130.

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

Peluco RG, Marques Jr J, Siqueira DS, Barbosa RS, Teixeira DB, Cortez LA (2013) Suscetibilidade magnética do solo e estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 48:661-672.

Quaggio JA, Raij B van (2008) Cálcio, magnésio e correção da acidez do solo. In: Dinardo-Miranda LL, Vasconcelos ACM, Landell MGA. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, p. 313-321.

Raij B van, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (2011) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico.

Ramos PV, Dalmolin RSD, Marques Jr J, Siqueira DS, Almeida JA, Moura-Bueno JM (2017) Magnetic susceptibility of soil to differentiate soil environments in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 41:1-13.

Resende M, Santana DP, Rezende SB (1988) Suscetibilidade magnética em Latossolos do sudeste e Sul do Brasil. III REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÕES DE APTIDÃO AGRÍCOLA, **Anais...** Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS/SECS, p. 233–258.

Robertson GP (1998) **GS+: geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software.

Royall D (2001) Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. **Catena** 46:15-34.

Sanchez RB, Marques Jr J, Pereira GT, Baracat Neto J, Siqueira DS, Souza ZM (2012) Mapeamento das formas do relevo para estimativa de custos de fertilização em cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola** 32:280-92.

Siqueira DS, Marques Jr J, Pereira GT, Teixeira DDB, Vasconcellos V, Carvalho Jr O, Martins E (2015) Detailed mapping unit design based on soil landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena** 135:149-162.

Sousa DMG, Lobato E (2004) **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. 416 p.

Sousa DMG de, Lobato E, Reint TA (2006) A recomendação de adubação fosfatada com base na capacidade tampão de fósforo do solo para a região do Cerrado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS. **Resumos...** Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, p.1.

Teixeira, DDB, Marques Jr J, Siqueira, DS, Vasconcelos V, Carvalho, AO, Martins ES, Pereira GT (2018) Mapping units based on spatial uncertainty of magnetic susceptibility and clay content. **Catena** 164:79-87.

Tesfahunegn GB, Tamenec L, Vlek PLG (2011) Catchment-scale spatial variability of soil properties and implications on site-specific soil management in northern Ethiopia. **Soil and Tillage Research** 117:124-139.

Van Dam R, Harrison JBJ, Hirschfeld DA, Meglich TM, Li Y, North RE (2008) Mineralogy and magnetic properties of basaltic substrate soils: Kaho'olawe and Big Island, Hawaii. **Soil Science Society of America Journal** 72:244-257.

Vasconcelos V, Martins ES, Carvalho Jr AO, Marques Jr J, Siqueira DS, Couto Jr AF, Guimaraes RF, Gomes RAT, Reatto A (2013) Modelo de Evolução Pedogeomorfológica

da Serra da Canastra, MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, 14:197-212.

Verosub KL, Roberts AP (1995) Environmental magnetism: past, present and future. **Journal of Geophysical Research** 100:2175-2192.

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

Vitti GC, Luz PHC, Malavolta E, Dias AS, Serrano CGE (2008) **Uso de gesso em sistemas de produção agrícola**. Piracicaba: GAPE, 104p.

Vitti GC, Mazza JA (2002) **Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar**. Informações Agronômicas, n.97,16 p. (POTAFOS. Encarte Técnico).

Warrick AW, Nielsen DR (1980) Spatial variability of soil physical properties in the field. In: **Hillel D. Applications of soil physics**. New York: Academic, p.319-344.

Zawadzki J, Magiera T, Fabijańczyk P, Kusza G. Geostatistical 3-dimensional integration of measurements of soil magnetic susceptibility (2012). **Environmental Monitoring and Assessment** 184:3267-3278.

CAPÍTULO 3 – Considerações finais

Os capítulos anteriores discutem técnicas de quantificação indireta para o zoneamento das aplicações de calagem, gessagem e fosfatagem corretiva do solo. Como informado no primeiro capítulo, estas recomendações são o passo inicial para otimizar o desenvolvimento da produção agrícola. Em decorrência da escassez e da dependência externa de adubos químicos, saber os locais e a quantidade que se aplica tornou-se uma necessidade de extrema importância. É desta forma que o apelo a novas técnicas de recomendação irá gerar cenários que buscam novos ângulos de como respeitar de maneira mais consciente o ambiente, o desperdício e a valorização de profissionais que sabem a importância de gerar alimentos e produção de energia de forma mais sustentável.

No que tange ao emprego da suscetibilidade magnética do solo para fins de zoneamento de áreas específicas, como exposto no segundo capítulo, destacam-se a rapidez com que são gerados os dados, a simplicidade no manuseio, o não uso de reagentes químicos e o não descarte de produtos que seriam liberadas à natureza. Não obstante, vale ressaltar que esta técnica tem sido ferramenta de estudos de muitos autores que já a utilizaram para avaliações de diversas naturezas, tais como em análises químicas, físicas e biológicas. Assim, os resultados ligados a esta técnica de quantificação indireta motivam a futuros trabalhos para validar e operar mais e mais a suscetibilidade magnética do solo nas atividades agrícolas, em regiões tropicais.

Ambos os capítulos dão ênfase ao emprego de novas tecnologias e ferramentas que darão resultados inovadores. Basta lembrar, entretanto, que o complexo solo-planta-atmosfera não depende unicamente da fertilidade do solo, mas também de um manejo que respeite a bioestrutura do solo. Como os minerais regem a complexidade do solo, e se diferenciam de um solo para o outro, as recomendações de corretivos e adubações serão diferentes. A suscetibilidade magnética do solo consegue captar estas diferenças a nível mineralógico, e por isso torna-se uma ferramenta com potencial real de ser usada em larga escala, sobretudo para priorizar a análise de manejo da mesma forma ou até mais eficientemente que as análises convencionais. É desta forma que a

prática destes resultados, nestes capítulos, irá ajudar a passos de recomendações de forma rápida, inovadora e simples para a agricultura em solos tropicais.