

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

**SUBSOLAGEM EM PROFUNDIDADE VARIADA COM BASE
NO MAPEAMENTO DE ÁREAS DE MANEJO ESPECÍFICO**

Lucas Aguilar Cortez
Engenheiro Agrônomo

2013

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

**SUBSOLAGEM EM PROFUNDIDADE VARIADA COM BASE
NO MAPEAMENTO DE ÁREAS DE MANEJO ESPECÍFICO**

Lucas Aguilar Cortez

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

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

2013

Cortez, Lucas Aguilar
C828s Subsolagem em profundidade variada com base no mapeamento
de áreas de manejo específico/ Lucas Aguilar Cortez. – –
Jaboticabal, 2013
x, 57 p. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2013
Orientador: José Marques Júnior
Banca examinadora: Carlos Eduardo Angeli Furlani, Mauricio dos
Santos Simões
Bibliografia

1. Subsolagem. 2. Compactação do solo. 3. Cana de açúcar. 4.
Mineralogia do solo. 5. Pedotransferência. 6. Geoestatística. I.
Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias.

CDU 631.42



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: SUBSOLAGEM EM PROFUNDIDADE VARIADA COM BASE NO MAPEAMENTO DE ÁREAS DE MANEJO ESPECÍFICO

AUTOR: LUCAS AGUILAR CORTEZ

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

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



Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. MAURÍCIO DOS SANTOS SIMÕES

Usina Sao Martinho Acucar e Alcool S/A / Pradópolis/SP



Prof. Dr. CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI

Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Data da realização: 14 de agosto de 2013.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

LUCAS AGUILAR CORTEZ – nascido em 27 de março de 1987 em Ribeirão Preto – SP, graduado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – FCAV/UNESP Jaboticabal (2010). Foi bolsista de iniciação científica pela FAPESP no período de 2007 a 2010. Exerce o cargo de Suporte Técnico de Plantio na Usina São Martinho Açúcar e Álcool S/A. Atuação profissional com preparo de solo, plantio e colheita mecanizada. Estudos com ênfase em mineralogia do solo, física do solo, química do solo, variabilidade espacial, cana-de-açúcar, agricultura de precisão, relação solo-paisagem, gênese do solo, pedotransferência e geoestatística. Membro do grupo de pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME / UNESP).

DEDICO

*Aos dois maiores responsáveis por tudo que sou até hoje, os meus verdadeiros
companheiros, meus amigos, meus exemplos, meus heróis... Meus pais que tanto*

amo,

José Carlos Cortez da Silva e Ana Gomes Aguilar da Silva

OFEREÇO

À minha outra metade, minha companheira, meu grande amor, a pessoa que Jesus me confiou como minha esposa Amanda De Nadai Correa Cortez. Ao meu irmão Allan Aguilar Cortez, meu grande exemplo, homem no qual busco seguir os passos a cada dia. A minha cunhada Francine, meu afilhado João Pedro e minha sobrinha Louise. A minha madrinha Claudia e meu irmão João Victor. Minha vó Ida e também aos meus avós que infelizmente já partiram fisicamente, mas que de uma forma ou de outra sei que sempre estará intercedendo junto a mim: Antônio Gomes Aguilar (*in memoriam*) Lídia Cortez (*in memoriam*) e Alcides Rodrigues (*in memoriam*). A todos os tios, tias, primos, prima e por fim todos da segunda família que com a graça de Deus somei por meio de meu casamento. Vocês são o alicerce da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, sem dúvida o grande responsável por tudo!

Ao Prof. Dr. José Marques Júnior, pela orientação, ensinamentos, amizade e acima de tudo pela paciência, desde o início de minha graduação.

Aos membros da banca examinadora Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani e Dr. Maurício dos Santos Simões, pelas valiosas contribuições e sugestões.

À todos os amigos integrantes do Grupo de Pesquisa CSME, em especial, Diego Silva Siqueira (Pimpão), Rafael Gonçalves Peluco e Frederico Luiz Siansi, pela convivência, apoio e acima de tudo verdadeira amizade.

Aos meus amigos pessoais que fazem a vida ficar cada dia mais prazerosa José Henrique, Kadu, Viuva e Daniel De Bortoli Teixeira.

À todos os amigos dentro e fora da universidade, especialmente aos amigos da Usina São Martinho, ao Luis Gustavo Teixeira, mais que um chefe um amigo, ao meu grande companheiro de trabalho Bruno Mazzaron, a todos líderes da USM em especial José Arlindo, Ailton, Gutierrez e todos que fazem parte de nossa grande equipe de trabalho que sem dúvidas alguma tem grande parte desse mérito.

À Usina São Martinho S/A pelo apoio na realização dos trabalhos e pela concessão da área de estudo.

À FCAV - UNESP JABOTICABAL, pela estrutura fornecida para minha graduação e pós-graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro.

Finalmente, à todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para realização deste trabalho.

“NENHUM DE NÓS É TÃO CAPAZ QUANTO TODOS JUNTOS”

(W. BENNIS)

INDICE

CAPÍTULO 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 REVISÃO DE LITERATURA	2
1.2.1 Relação Solo-Paisagem, variabilidade dos atributos do solo e áreas de manejo específico.....	3
1.2.2 Compactação do solo e Subsolagem.....	4
1.2.3 Suscetibilidade magnética e suas utilizações no estudo dos atributos do solo ..	6
1.2.4 Geoestatística aplicada em ciências agrárias	7
1.2.5.1 Variograma.....	8
1.2.5.2 Krigagem	10
1.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	11
CAPÍTULO 2. VARIABILIDADE HORIZONTAL E VERTICAL DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DO SOLO.....	
20	20
2.1. INTRODUÇÃO.....	20
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
2.2.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E AMOSTRAGEM	22
2.2.2 COLETA E AVALIAÇÃO DOS ATRIBUTOS DO SOLO	23
2.2.3. ANÁLISES ESTATÍSTICAS E GEOESTATÍSTICA	23
2.2.4. SUBSOLAGEM.....	24
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
2.4. CONCLUSÃO	33
2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33
CAPITULO 3. RELAÇÃO DA MINERALOGIA E SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA COM A QUALIDADE FÍSICA DO SOLO	
40	40
3.1. INTRODUÇÃO.....	40
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3.2.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	41
3.2.2. AMOSTRAGEM E METODOLOGIA DE LABORATÓRIO	42

3.2.2.1. ANÁLISES FÍSICAS.....	43
3.2.2.2. ANÁLISES QUÍMICAS.....	43
3.2.2.3. ANALISES MINERALÓGICAS.....	44
3.2.2.4. SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA	45
3.2.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	46
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
3.4. CONCLUSÃO	51
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

SUBSOLAGEM EM PROFUNDIDADE VARIADA COM BASE NO MAPEAMENTO DE ÁREAS DE MANEJO ESPECÍFICO

Resumo– A compactação do solo tem se destacado a nível mundial como sendo um dos principais fatores limitantes há produção das culturas. Considerando que a subsolagem, prática agrícola que visa neutralizar este problema, possui elevado custo operacional além de ocasionar elevada queima de combustível fóssil, faz-se necessário estudos que visam otimizar esta operação. Desta maneira o objetivo deste trabalho é mapear os locais de compactação, por meio de técnicas indiretas como suscetibilidade magnética do solo, procedendo à subsolagem somente em áreas cujo grau de compactação seja restritivo ao crescimento radicular, avaliando assim a capacidade operacional e consumo de combustível desta operação em relação à subsolagem realizada em área total. A área de estudo localiza-se, município de Guariba (SP), o solo característico é oxisoil, e encontra-se sob cultivo de cana-de-açúcar com colheita mecanizada há seis anos. Foram avaliados parâmetros físicos do solo como resistência à penetração, densidade, umidade, textura e suscetibilidade magnética. A subsolagem localizada e em profundidade variada proporcionou um incremento na capacidade operacional de até 61,7% em relação aos métodos convencionais. Já para o consumo e queima de combustível houve uma redução de até 57,1%. Conclui-se que esta técnica pode ser utilizada para auxiliar no desenvolvimento de estratégias mais eficazes permitindo a construção de cenários para auxiliar no manejo local sobre a operação de subsolagem.

Palavras-Chave: Variabilidade espacial, subsolagem localizada, compactação do solo, cana-de-açúcar

SUBSOILING DEPTH VARIED BASED ON THE MAPPING OF AREAS OF SPECIFIC MANAGEMENT

Abstract- Soil compaction has emerged worldwide as one of the main limiting factors for crop production. Whereas subsoiling agricultural practice meant to counteract this problem has high operating costs in addition to causing high fossil fuel combustion, it is necessary studies to optimize this operation. Thus the aim of this study is to map the locations of compaction through indirect techniques such as magnetic susceptibility of the soil, proceeding to subsoiling only in areas where the degree of compaction is restrictive to root growth, thus evaluating the operational capacity and fuel consumption of this operation in relation to subsoiling in total area. The study area is located in the municipality of Guariba (SP), the soil is a oxisoil, and is under cultivation of sugar cane with mechanical harvesting six years ago. We assessed soil physical parameters such as penetration resistance, bulk density, moisture, texture and magnetic susceptibility. The subsoiling localized and varying depth provided an increase in operating capacity of up to 61.7% compared to conventional methods. As for the consumption and burning fuel was reduced by up to 57.1%. It is concluded that this technique can be used to aid in the development of effective strategies allowing the construction of sets for assisting in the management operation on the local sub soiling.

Keywords: Spatial variability, subsoiling located, soil compaction, sugar cane.

CAPÍTULO 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a cultura da cana de açúcar destaca-se pela elevada área produtiva, sendo este o principal produtor mundial da cultura. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) a área cultivada com cana-de-açúcar que será colhida na safra 2013/14 está estimada em 8.893 milhões de hectares.

Apesar das áreas produtivas se concentrarem nas regiões Centro Sul e Nordeste do Brasil, a cultura vem se expandindo em todas as regiões do país, nos mais diferentes tipos de solo, os quais expressam o resultado da interação de inúmeros fatores como material de origem, clima, relevo, compartimentos geológicos entre outros (CORTEZ et al., 2011). A interação desses fatores resulta em elevada variabilidade do solo, onde o conhecimento da variabilidade dos atributos do solo é fundamental para o planejamento agrícola sustentável (BARBIERI et al. 2008).

O solo representa um ambiente heterogêneo, não renovável, cujo equilíbrio pode ser afetado por fatores bióticos e abióticos do ambiente, desta forma tornar-se imprescindível um gerenciamento sustentável a fim de impedir sua degradação física pela erosão e compactação (KIBBLEWHITE et al., 2008).

A compactação do solo é apontada por CANILLAS & SALOKHE (2002) como sendo um dos principais causadores da degradação dos solos agrícolas. Como consequência o solo apresenta redução da porosidade, aeração, infiltração de água e aumento da resistência á penetração de raízes. Esta quando presente em solos cultivados com cana-de-açúcar tem sido o principal fator que afeta a produtividade (TANAKA & JUNIOR, 2007), sendo agravada pelo elevado nível de mecanização dessa cultura.

Pesquisadores investigam a compactação, devido ao tráfego de máquinas, e seus efeitos sobre a produção agrícola, como redução de produtividade, aumento da suscetibilidade do solo a erosão e aumento da potência necessária para o preparo de solo (BECERRA et al., 2010;. BOTTA et al., 2010). Considerando que a subsolagem, prática que visa descompactação do solo, possui elevado custo operacional e elevada demanda energética, tornam-se importantes estudos que norteiem melhores procedimentos para que problemas não sejam acrescentados

devido a operações inadequadas ou mesmo locais onde a subsolagem faz-se desnecessária (SALVADOR et al., 2008).

Nesse sentido, conhecer os atributos físicos do solo, inferindo sobre o estado da compactação, pode ser importante ferramenta para auxiliar o manejo local das operações agrícolas. Vários autores (VIEIRA et al., 1983; McBRATNEY, 2003; SIQUEIRA; MARQUES JUNIOR; PEREIRA, 2010) têm estudado a delimitação de zonas específicas de manejo com base no uso da geoestatística. No entanto, a aplicação desta técnica requer um elevado número de amostras (LEGROS, 2006; CORTEZ et al., 2011) onerando a atividade.

A agricultura atual aspira por métodos de detecção rápida e precisa na determinação de propriedades físicas do solo, visto a complexidade e custo dos atuais métodos (MONTANARI et al. 2012). Buscando ferramentas alternativas, pesquisadores investem nos estudos das aplicações de funções de pedotransferência (MCBRATNEY et al., 2002), estimando atributos do solo, a partir de outros atributos medidos com maior facilidade e baixo custo, como exemplo a suscetibilidade magnética.

Segundo MAHER & THOMPSON (1999), os minerais com capacidade magnética armazenam arquivos naturais contendo registros dos fatores e processos de formação do solo. A suscetibilidade magnética (SM) é um atributo de fácil medição que pode ser utilizada em funções de pedotransferência (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000), tendo em vista os resultados favoráveis de pesquisas utilizando-a como ferramenta auxiliar na previsão da variabilidade espacial dos atributos do solo (SIQUEIRA, 2010).

Nesse sentido o objetivo deste trabalho é a identificação de áreas com diferentes potencias de compactação do solo por meio de técnicas indiretas como a suscetibilidade magnética, auxiliando no planejamento local sobre a operação de subsolagem bem como o manejo da cultura visando à manutenção das condições físicas adequadas para cultura da cana de açúcar.

1.2 REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1 Relação Solo-Paisagem, variabilidade dos atributos do solo e áreas de manejo específico

A influência das formas do relevo e suas implicações na variabilidade dos atributos do solo têm sido estudada por diversos autores (NIZEYIMANA & BICKI 1992; DE ALBA et al. 2004; VAN OOST et al. 2005; BRITO et al. 2006; MARQUES JÚNIOR 2009; SIQUEIRA et al., 2010; CAMARGO et al., 2010). Pesquisas ainda avaliam a influência da paisagem sobre a variabilidade dos atributos físicos do solo e sua relação com o crescimento da planta (PENNOCK et al, 2001., REZAEI & GILKES, 2005; TERRA et al, 2006).

A influência do relevo nos atributos do solo, ocorrida por conta da distribuição dos fluxos de água tanto no sentido vertical como no horizontal (VERITY & ANDERSON, 1990), possui relação direta com a produção das culturas (ALBUQUERQUE et al., 1996). Assim, como os atributos do solo, a planta também apresenta relações dependência com o relevo. Nos estudos de KRAVCHENKO & BULLOCK (2000), foi observado que há uma variação na distribuição espacial do teor de proteína e óleo da cultura da soja influenciada pela topografia.

SOARES et al. (2005) afirmam que, para compreender a variação dos atributos físicos do solo, é necessário considerar variações verticais e laterais ao longo da topossequência. Nesse sentido as propriedades do solo variam sistematicamente nas direções verticais e laterais (WILDING & DREES, 1983) como função da posição do local da paisagem, fatores de formação do solo e/ou práticas de manejo do solo (BECKETT & WEBSTER, 1971).

A paisagem pode ser utilizada na definição de zonas de manejo e juntamente com o estudo da variabilidade espacial, possibilita melhor controle dos fatores de produção das culturas e proteção ambiental (FRAISSE et al., 1999). Os ambientes de produção para cana-de-açúcar assim como outras classificações técnicas, como o mapa de capacidade e uso do solo, são elaborados com base nos levantamentos de solos. Assim o conhecimento das relações entre solo e a posição da paisagem pode subsidiar levantamentos de solos com maior acurácia (MARQUES JÚNIOR & LEPSCH, 2000), subsidiando desta forma a adoção de melhores práticas de manejo.

MARQUES JÚNIOR (2009) propõem que os estudos sobre manejo do solo, envolvam a análise espacial quantitativa dos seus atributos, permitindo identificar e

mapear áreas de manejo específico. Neste local a variabilidade dos atributos do solo é mínima, próximo à homogeneidade, permitindo a transferência de tecnologia para áreas semelhantes (MALLARINO et al., 2001). Para identificar estas áreas alguns pesquisadores tem proposto a associação de conceitos de relação solo-paisagem com ferramentas de classificação numérica (SIQUEIRA et al. 2010).

A técnica do mapeamento de áreas de manejo específico, que faz uso da relação solo-paisagem e da classificação numérica, tem sido utilizada com êxito na caracterização de atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo (SOUZA et al., 2009; CAMARGO et al., 2008), otimização amostral (MONTANARI, et al., 2005), planejamento agrícola e implantação de sistemas de cultivo para cana-de-açúcar (CAMPOS et al., 2007), estudo da emissão de CO₂ (PANOSSO et al., 2008), perda de solo e nutrientes por erosão (IZIDORIO et al., 2005) e cultivo de citros (SIQUEIRA et al., 2010). Dessa maneira, esses trabalhos podem ser utilizados para nortear a identificação de limites entre áreas com diferentes padrões de variabilidade no campo, e assim, serem tomados como referência para o planejamento das operações agrícolas.

1.2.2 Compactação do solo e Subsolagem

O termo compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado durante a qual existe um aumento de sua densidade em consequência da redução de seu volume, resultante da expulsão do ar dos poros do solo. Quando o fenômeno de redução de volume ocorre com a expulsão de água dos poros, este passa a se chamar adensamento. Em ambos os casos, esta redução de volume é devida ao manejo inadequado do solo DIAS JUNIOR (2000).

Altos valores de resistência do solo à penetração podem interferir no crescimento das raízes em comprimento, diâmetro (MEROTTO & MUNDSTOCK, 1999) e na direção preferencial do crescimento radicular. Além disso, estudos indicam que a resistência do solo à penetração das raízes tem efeitos diretos no crescimento da parte aérea das plantas e na partição de carboidratos entre a raiz e parte aérea (MASLE & FARQUHAR, 1988), porém isto pode ser modificado pela operação de subsolagem.

A subsolagem é uma prática de cultivo em profundidade que tem como finalidade o rompimento das camadas compactadas sem, entretanto, causar inversão do solo, devendo ser recomendada, somente, quando houver a presença de uma camada muito endurecida, em profundidades não atingidas por outros implementos (CAMARGO & ALLEONI, 1997).

Segundo CASTRO (1985), é uma prática agrícola cujo objetivo é quebrar camadas compactadas do solo abaixo daquela considerada arável (0,20 a 0,25 m), alcançando a profundidade de trabalho de no mínimo 0,30 m. Para a ASAE (1999), essa profundidade deve ser maior que 0,40 m com o propósito de desagregar o solo, melhorando com isso o crescimento das raízes em profundidade e a movimentação da água ao longo do perfil. TAYLOR E BELTRAME (1980), RÍPOLI et al. (1985) e GADANHA JÚNIOR et al. (1991) consideram que a subsolagem pode atingir profundidades de até 0,80 m.

Os efeitos benéficos da subsolagem são normalmente temporários e a resistência à penetração retorna a seus valores originais em cerca de 2 a 4 anos, dependendo do tipo de solo e das práticas culturais predominantes.

Uma estratégia usada por algumas usinas é proceder à subsolagem apenas no canteiro de plantio, denominada subsolagem localizada. Esta operação tem como princípio a redução do número de hastes e menor mobilização do solo. Segundo LANÇAS (1988) e BICUDO (1990), o número de hastes tem influência no consumo de óleo diesel e desempenho operacional, fornecendo maior consumo conforme se aumenta o número de hastes e apresentando, portanto, menor desempenho.

Por meio da subsolagem localizada espera-se obter maior capacidade operacional e menor consumo de combustível visto a menor mobilização do solo que esta operação preconiza. Com as zonas de tráfegos pré-estabelecidas, “canteirização”, é possível constatar também menor resistência ao rolamento, facilitando operações subsequentes como plantio, tratamentos culturais e colheita. Apesar de estas iniciativas práticas obterem bons resultados, existe ainda uma lacuna na literatura a respeito da viabilidade econômica e operacional da subsolagem localizada em cultivo de cana-de-açúcar.

1.2.3 Suscetibilidade magnética e suas utilizações no estudo dos atributos do solo

No extenso território brasileiro, por meio dos levantamentos de solos em pequena escala pode-se ter uma ampla visão e reconhecer grandes áreas com conclusões equivocadas de homogeneidade. Nos ambientes tropicais, segundo BUOL (1990), a realidade da variabilidade dos solos é mascarada pelos levantamentos em pequena escala, que proporcionaram um falso sentido de uniformidade. O conhecimento sobre a variabilidade dos atributos do solo é de grande importância para a identificação do potencial agrícola (SIQUEIRA, 2010) e desenvolvimento sustentável das práticas de manejo do solo (LÓPEZ, 2009).

Segundo McBRATNEY et al. (2002), no estudo e avaliação quantitativa dos atributos do solo, a coleta e análise das amostras são as etapas mais intensivas e onerosas. A agricultura atual exige metodologias mais rápidas e econômicas para a realização das análises do solo (OKIN & PAINTER, 2004), tendo em vista o elevado número de amostras requeridas para caracterização de áreas de manejo específico (VISCARRA ROSSEL et al., 2006; TITTONEL et al., 2008).

No intuito de diminuir os custos com a obtenção de informações nos estudos em ciência do solo, alguns autores (McBRATNEY et al., 2002) propõem o uso de funções de pedotransferência, as quais são definidas como modelos matemáticos que são utilizados na agricultura moderna para estimar, indiretamente, atributos do solo de maneira simples, rápida e confiável.

Um exemplo desta propriedade é a suscetibilidade magnética (SM), a qual tem demonstrado apresentar relação de interdependência entre os atributos do solo (PETROVSKÝ et al., 1998; GRIMLEY & VEPRASKAS, 2000; ROYAL, 2001). Pesquisas têm utilizado com êxito a suscetibilidade magnética (SM) na quantificação indireta de propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo (SIQUEIRA et al., 2010).

O resultado da interação do conjunto de fatores de formação do solo como material de origem, clima, relevo, tempo, flora e fauna, é expresso por meio da variabilidade espacial dos atributos que o compõem (CORTEZ et al., 2011). Desta forma a SM varia com a topografia, clima, biodiversidade, fluxo de água e ação antrópica (EYRE & SHAW, 1994; SINGER et al., 1996; DE JONG et al., 2000).

Diante destes aspectos alguns autores (SCHACHTSCHABEL et al. 1998; MAHER; THOMPSON 1999) afirmam que 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 no mapeamento destes locais (SIQUEIRA, 2010).

Vários trabalhos envolvendo a SM apresentaram resultados de correlação com atributos físicos e químicos dos solos (HANESCH & SCHOLGER, 2005), atributos mineralógicos em diferentes classes de solos (CHEVRIER & MATHÉ, 2007; TORRENT et al., 2008), e relação com atributos da cana-de-açúcar (MARQUES JUNIOR., 2009).

Segundo DEARING et al., 1996 a SM é ideal para a realização de estudos que requerem grande quantidade de amostras, como os de variabilidade espacial, visto o baixo custo da técnica, ser relativamente sensível, rápida e com impacto ambiental nulo, no que diz respeito ao uso de reagentes químicos. Outra vantagem é que as medidas podem ser realizadas no campo e ser também empregadas como complemento de outros tipos de análises laboratoriais. Portanto, a avaliação desse atributo pode auxiliar no mapeamento de áreas homogêneas de forma mais rápida e econômica.

1.2.4 Geoestatística aplicada em ciências agrárias

Surgida na África do Sul as primeiras aplicações da geoestatística ocorreram na mineração (DAVID, 1970; JOURNEL, 1974), quando o engenheiro de minas D. G. Krige, trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que não conseguia encontrar sentido nas variâncias, se não levasse em conta a distância entre as amostras (KRIGE, 1951). Utilizada para fins diversos, a geoestatística passou a ser empregada em estudos da variabilidade de atributos do solo, nos quais a estatística clássica não consegue representar (VIEIRA et al., 1983; TRANGMAR et al., 1985).

Os atributos do solo, em geral, não são aleatoriamente distribuídos no espaço (RUSSO & BRESLER, 1981). UPCHURCH & EDMONDS (1993) afirmam que os métodos estatísticos e as modalidades de coleta tradicionais, normalmente, são

inadequados para os estudos que visam a entender os processos responsáveis pela variabilidade do solo.

ISAAKS & 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 com análises geoestatísticas. Segundo REICHARDT et al. (1986) de fato a estatística clássica e a geoestatística se completam

Para realização de tais estudos pesquisadores têm utilizado métodos de classificação numérica, estatística multivariada, lógica fuzzy, geoestatística, métodos de fractais, entre outros (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., 1992; WEBSTER, 2000).

Muitos trabalhos utilizaram a geoestatística para compreender a distribuição espacial de 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 atributos da planta (TABOR et al., 1984; MULLA, 1993; SALVIANO et al., 1995). Dessa maneira, o uso da geoestatística no estudo da distribuição espacial, no contexto das relações solo-relevo, possibilita nova interpretação da interação entre atributos do solo e atributos das culturas.

1.2.5.1 Variograma

O gráfico que reproduz a existência ou não de dependência espacial de uma variável qualquer em estudo é denominado variograma. Ele pode ser representado analítica e/ou graficamente, sendo estimado pela equação 1.

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

Em que,

$\hat{\gamma}(h)$: é a variância estimada;

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

Z : representa os valores medidos para atributos do solo ou da cultura.

O variograma normalmente é representado pelo gráfico de $\gamma(h)$ versus h . Ele começa no valor chamado de variância pepita (C_0) e vai aumentando obedecendo a semivariância, até uma distância conhecida como alcance (a), onde atinge o patamar ($C_0 + C_1$), conforme mostrado na Figura 1.2.

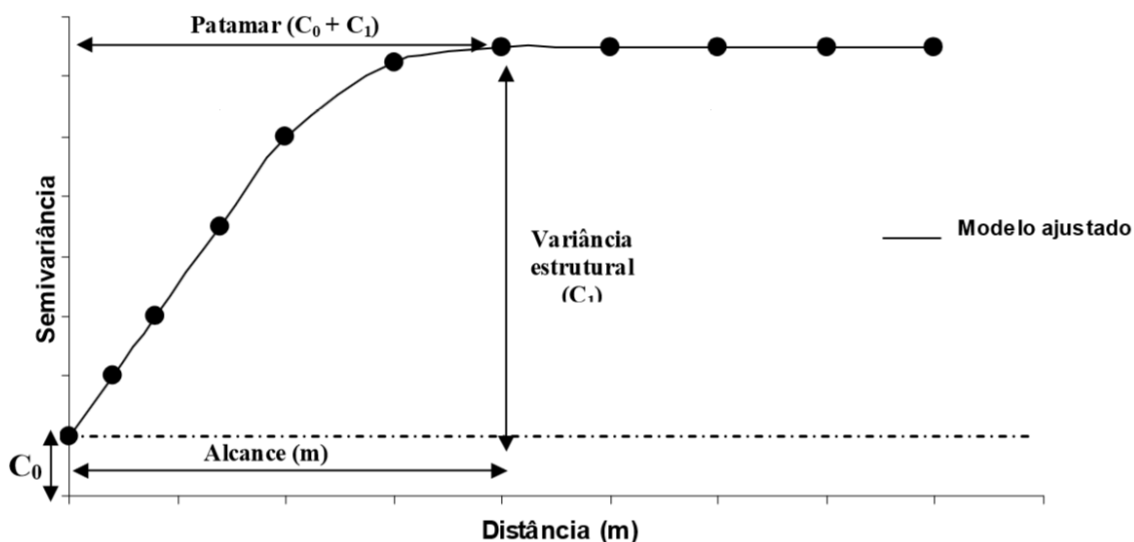


Figura 1.2. Variograma experimental de um atributo qualquer do solo.

Para pesquisadores como CAMBARDELLA et al. (1994), SALVIANO et al. (1998) e OLIVEIRA et al. (1999) a variância pepita (C_0), que é um dos parâmetros avaliados pelo variograma, representa a variação não dependente espacialmente sobre o alcance examinado, ou seja, ela indica a variabilidade não explicada, podendo ser originada dos erros de medição ou de microvariações não detectadas quando é considerada a distância de amostragem utilizada.

Para ISAAKS & 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).

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.

O alcance é um indicador da distância de separação em que dentro dela existe dependência entre os pontos amostrados (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Em estudos da ciência do solo os modelos, exponencial e o esférico são os mais ajustados.

1.2.5.2 Krigagem

A estimativa de valores em pontos não amostrados a partir de seus vizinhos é realizada por um método geoestatístico de interpolação. Existem vários interpoladores, sendo a krigagem o mais utilizado e complexo. KRAVCHENCO & BULLOCK, (1999), comparando vários interpoladores, concluíram que a krigagem foi o melhor interpolador para estimar atributos do solo na paisagem.

Neste método, pontos com maior proximidade do lugar onde foi realizada a amostragem tem 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 uma melhor estimativa de valores, utiliza um interpolador linear não tendencioso (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1991; ISAAKS; 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 .

A construção de um mapa da área de estudo e a definição de isovalores definidos pela krigagem é ferramenta importante no planejamento agrícola, visto que permite a visualização e interpretação do comportamento e distribuição espacial dos atributos do solo avaliados. Essas informações são extremamente importantes para a tomada de decisão sobre o manejo específico a ser adotado em cada área delimitada pelos mapas (BURGESS & WEBSTER, 1980).

1.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 151-157, 1996.

ASAE. American Society of Agricultural Engineers, ASAE standards: standards engineering practices data. San Joseph, 1999.

BARBIERI, D. M. **Formas do relevo e variabilidade espacial de atributos químicos e mineralógicos de um argissolo cultivado com cana-de-açúcar**. 2007, 83 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.

BECERRA, A. T.; G. F.; BOTTA, X.; LASTRA BRAVO, M.; TOURN, F.; BELLORA MELCON, J.; VAZQUEZ, D.; RIVERO, P.; LINARES, G. N. Soil compaction distribution under tractor traffic in almond (*Prunus amygdalus* L.) orchard in Almeria Espana, *Soil & Tillage Research*, 107: 49-56 73,145- 160, 2010.

BECKETT, P. H. T.; WEBSTER, R. Soil variability: a review. **Soils and Fertilizers**, Farham Royal, v. 34, n.1, p. 1-15, 1971.

BICUDO, S. J. Subsolador: algumas relações entre profundidade de trabalho, largura das sapatas e número de hastes. Tese (Doutorado em Agronomia) Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 130p,1990.

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

BOTTA, G. F.; TOLON BECERRA, A.; LASTRA BRAVO, X.; TOURN, M. Tourn Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean

(Glycine max L.) yields in Argentinean pampas. *Soil & Tillage Research*, 110: 167 – 174, 2010.

BRITO, L.F.; SOUZA, Z.M.; MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAZETTA, D.A.; CALZAVARA, S.A. & OLIVEIRA, L. Influência de formas do relevo em atributos físicos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Ci. Rural*, 36:1749-1755, 2006.

BUOL, S. W. Suelos tropicales: clasificación y características. In: SALINAS, J.G.; GOULEY, L.M. **Sorgo para suelos ácidos**. Cali: CIAT, 1990. p. 49-62.

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

BURROUGH, P.A.; BOUMA, J.; YATES, S.R. The state of the art in pedometrics. **Geoderma**, Amsterdam, v.62, n.1-3, p.311-326, 1994.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo. I-Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2269-2277, 2008.

CAMARGO, Livia Arantes; MARQUES JUNIOR, José and PEREIRA, Gener Tadeu. **Spatial variability of physical attributes of an alfisol under different hillslope curvatures**. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* [online]. 2010, vol.34, n.3, pp. 617-630. ISSN 0100-0683.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132p.

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

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMARGO, L. A. Relações solo-paisagem em uma litossequência arenito-basalto na região de Pereira Barreto, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 519-539, 2007.

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.65, n.2, p.221-230, 2002.

CASTRO, O. M. **Aspectos de manejo do solo**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 43-70p.

CHEVRIER V.; MATHÉ P. E. Mineralogy and evolution of the surface of Mars: a review. **Planetary and Space Science**, Elmsford, v. 55, n. 3, p. 289–314, 2007.

CORTEZ, L. A.; MARQUES JR., J.; PELUCO, R. G.; TEIXEIRA, D. B.; SIQUEIRA, D. S. Suscetibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. *Energia na agricultura*, Botucatu, v.26, p.60-79, 2011.

DAVID, M. The geostatistical estimation of porphyry-type deposits and scale factor problems. In: *Pribam Mining Congress*, Praga. Proceedings. Praga, p.91-109, 1970.

DE ALBA, S.; LINDSTROM, M.; SCHUMACHER, T.E. & MALO, D.D. Soil landscape evolution due to soil redistribution by tillage: A new conceptual model of soil catena evolution in agricultural landscapes. *Catena*, 58:77- 100, 2004.

DE JONG, E.; PENNOCK, D.J.; NESTOR, P.A. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada. *Catena*, v. 40, p. 291–305, 2000.

DEARING, J. A.; HAY, K. L.; BABAN, S. M. K.; HUDDLESTON, A. S.; WELLINGTON, E. M. H.; LOVELAND, P. J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International**, Oxford, v. 127, n. 3, p. 728–734, 1996.

DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., H.V. & CHAEFER, C.E.G.R. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.55-94.

EYRE, J.K.; SHAW, J. Magnetic enhancement of Chinese loess—the role of γ Fe₂O₃, *Geophysical Journal International.*, v. 117, p. 265–271, 1994.

FRAISSE, C.W.; SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R.; FRIDGEN, J.J. Use of unsupervised clustering algorithms of delineating within-field management zones. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1999. 121p. (ASAE Paper, 15).

GADANHA JÚNIOR, C. D.; MOLIN, J. P.; COELHO, J. L. D.; YAHN, C. H.; TOMIMORI, S. M. A. W. **Máquinas e implementos agrícolas do Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1991. 468p.

GRIMLEY, D. A.; VEPRASKAS, M. J. Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. Madison, **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 6, p. 2174-2180, 2000.

HANESCH, M.; SCHOLGER R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International**, Oxford, v.161, n. 1, p. 50–56, 2005.

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

IZIDORIO, R.; MARTINS FILHO, M. V.; MARQUES JR., J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G.T. Perdas de nutrientes por erosão e sua distribuição espacial em área sob cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 660-670, 2005.

JOURNEL, A.G. Geostatistical for conditional simulation of orebodies. **Economic Geology**, v.69, p.673-687, 1974.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, C.J. **Mining geostatistics**. 5 ed. London: Academic Press, 1991. 600p.

KIBBLEWHITE M.G.; RITZ K.; SWIFT M.J. Soil health in agricultural systems. *Phil. Trans. R. Soc. B*.363, 685–701, 2008.

KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, n.1, p. 75-83, 2000.

KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D.G. Comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 3, p. 393–400, 1999.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**. v.52, p.119-139, 1951

LANÇAS, K. P. Subsolador: desempenho em função de formas geométricas de hastes, tipos de ponteiros e número de hastes. 1988. 171p. Tese (Doutorado em Agronomia) Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1988.

LEGROS, J. P. **Mapping of the Soil**. Enfield, Jersey, Plymouth: Science Publishers. 411 pp. 2006.

- LÓPEZ, L. R. Pedologia quantitativa: espectrometria VIS-NIR-SWIR e mapeamento digital de solos. 2009. 171 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba 2009.
- MAHER, B. A.; THOMPSON, R. (Ed.). **Palaeomonsoons I: the magnetic record of palaeoclimate in the terrestrial loess and palaeosol sequences, in Quaternary Climates, Environments and Magnetism**, Cambridge: University Press, 1999. p. 81–125
- MALLARINO, A. P.; MAZHAR, U. H.; WITTRY, D.; BERMUDEZ, M. Variation in Soybean Response to Early Season Foliar Fertilization among and within Fields, **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 6, p.1220-1226, 2001.
- MARQUES JR, J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 113 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.
- MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I.F. Depósitos superficiais neoceno-zóicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. *Geociências*, v.19, p.265-281, 2000.
- MASLE J. FARQUHAR G D. Effects of soil strength in the relation of water-use efficiency and growth to carbon isotope discrimination in wheat seedlings. *Plant Physiol*. 86:32-38, 1988
- MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA JR.; BUENO, G. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 295-301, 2001.
- McBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003.
- McBRATNEY, A.; MYNASNY, B.; STEPHEN R. CATTLE, R. WILLEM VERVOORT. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam. v. 109, p. 41-73. 2002
- MEROTTO, A. J.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.23, p.197-202, 1999.
- MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40 n. 1, p. 69-77, 2005.

- MONTANARI R., SOUZA G. S. A., PEREIRA G. T., MARQUES JR. J., SIQUEIRA D. S., SIQUEIRA G. M. (2012). The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. *Precision Agriculture* 13:542–552
- MULLA, D. J. Mapping and managing spatial patterns in soil fertility and crop yield. In: ROBERT, P. C.; RUST, R. H.; LARSON, W. E. **Soil specific crop management**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1993. p.15-26.
- MULLA, D.J.; BATÍ, A.U.; HAMMOND, M.W.; BENSON, J.A. A comparison of winter wheat yield and quality under uniform versus spatially variable fertilizer management. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v.38, n.2, p.301-311, 1992.
- NIZEYIMANA, E. & BICKI, T.J. Soil and soil-landscape relationships in the North Central region of Rwanda, East-Central Africa. *Soil Sci.*, 153:225-236, 1992.
- OKIN, G. S.; PAINTER, T. H. Effect of grain size on remotely sensed spectral reflectance of sandy desert surfaces. *Remote Sensing of Environment*, New York, v. 89, n. 3, p. 272–280, 2004.
- OLIVEIRA, J.J.; CHAVES, L.H.G.; QUEIROZ, J.E. ; LUNA, J.G.de. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, n.4, p. 783-789, 1999.
- PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T. MARQUES JR., J.; LA SCALA JUNIOR, N. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 227-236, 2008.
- PAZ, A.; TABOADA, M. T.; GÓMEZ, M. J. Spatial variability in topsoil micronutrients contents in one-hectare cropland plot. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v. 27, n. 3-4, p. 479-503, 1996.
- PENNOCK, D.; WALLEY, F.; SOLOHUB, M.; SI, B. & HNATOWICH G. Topographically controlled yield response of canola to nitrogen fertilizer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:1838-1845, 2001.
- PETROVSKÝ, E.; KAPICKA, A.; ZAPLETAL, K.; SEBESTOVÁ, E.; SPANILÁ, T.; DEKKERS, M. J.; ROCHETTE, P. Correlation between magnetic properties and chemical composition of lake sediments from northern Bohemia: preliminary study. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v. 23, n. 9-10, p. 1123–1126, 1998.

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

REZAEI, S. A.; GILKES, R. J., The effects of landscape attributes and plant community on soil physical properties in rangelands. **Geoderma**, Amsterdam v. 125, n. 1-2, p. 145-154, 2005.

RÍPOLI, T. C.; MIALHE, L. G.; NAKAMURA, R. T. **Subsolagem e subsoladores**. Piracicaba: Centro Acadêmico Luiz de Queiroz, Departamento Editorial, 1985. 34p.

ROYAL, D. Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. **Catena**, Amsterdam, v. 46, n.1, p. 15-34, 2001.

RUSSO, D.; BRESLER, E. Soil hydraulic properties as stochastic processes: I analysis of field spacial variability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n. 4, p. 687, 1981.

SALVADOR, Nilson; BENEZ, Sérgio H. and MION, Renildo L.. **Consumo de combustível na operação de subsolagem realizada antes e depois de diferentes sistemas de preparo periódico do solo**. *Eng. Agríc.* [online]. 2008, vol.28, n.2, pp. 256-262. ISSN 0100-6916.

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Dependência espacial dos teores de macronutrientes da parte aérea da *Crotalaria juncea* em área de erosão acelerada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 115-122, 1995.

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria Juncea* L. em área severamente erodida. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 22, n. 01, p. 115-122, 1998.

SCHACHTSCHABEL, P.; BLUME, H. P.; BRÜMMER, G.; HARTGE, K. H. SCHWERTMANN, U. **Lehrbuch der Bodenkunde (Scheffer/Schachtschabel)**. 14th ed, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, p. 494. 1998.

SCOTT, H.D.; MAUROMOUSTAKOS, A.; HANDAYANI, I.P.; MILLER, D.M. Temporal variability of selected properties of loessial soil as affected by cropping. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1531-1538, 1994.

SINGER, M.J.; VEROSUB, K.L.; FINE, P.; TENPAS, J. A conceptual model for the enhancement of magnetic susceptibility in soils. Quaternary International, v. 34–36, p. 243–248, 1996.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; MATIAS, S. S. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. *Soil Use and Management*, Oxford, v.26, p.425-431, 2010

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, 55-66, 2010a.

SOARES, J.L.N.; ESPINDOLA, C.R. & PEREIRA, W.L.M. Physical attributes of soils under intensive agricultural management. *Sci. Agric.*, 62:165-172, 2005.

SOUZA, Z. M.; BARBIERI, D. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; CAMPOS, M. C. C. Influência da variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo na aplicação de insumos para cultura de cana-de-açúcar. *Ciência. Agrotecnologia*, Lavras, v. 31, n. 2, p. 371-377, 2007.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of the physical and mineralogical properties of the soil from the areas with variation in landscape shapes. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 52, n. 2; p. 305-316, 2009.

TABOR, J.A.; WARRICK, A.W.; PENNINGTON, D.A.; MYERS, D.E. Spatial variability of nitrate in irrigated cotton: I. Petioles. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 3, p. 602-607, 1984.

TANAKA, E.M. & SOUZA. JUNIOR, W.C. Solo duro. Paraguaçu Paulista, Escola Superior de Agricultura de Paraguaçu Paulista, 2007. (Boletim Técnico)

TAYLOR, J. C.; BELTRAME, L. F. S. Por que, quando e como utilizar a subsolagem. *Lavoura Arrozeira*, v.3, p.34-44, 1980..

TERRA, J. A.; SHAW, J. N.; VAN SANTEN, E. Soil Management and Landscape Variability Affects Field-Scale Cotton Productivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 1, p. 98–107, 2006.

TITTONELL, P.; SHEPHERD, K. D.; VANLAUWE, B.; GILLER, K. E. 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, Amsterdam, v. 123, n. 1-3, p. 137–150, 2008.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Diffuse reflectance spectroscopy. In: ULERY, A. L.; REES, L. R. D. Editors, **Methods of Soil Analysis**. Part 5. Mineralogical Methods, SSSA Book Series vol. 5, Soil Science Society of America, p. 367-387, 2008.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, p. 54-94, 1985.

UPCHURCH, D. R.; EDMONDS, W. J. Statistical procedures for specific objectives. In: MAUSBACJ, M. J.; WILDING, L. P. **Spatial variabilities of soils and landforms**. Madison: Soil Sci. Soc. Am., 1993. p.49-71.

VAN OOST, K.; van MUYSEN, W.; GOVERS, G.; DECKERS, J. & QUINE, T.A. From water to tillage erosion dominated landform evolution. *Geomorphology*, 72:193-203, 2005

VERITY, G. E.; ANDERSON, D. W. Soil erosion effects on soil quality and yield. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 70, n.1, p. 471-484, 1990.

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

VISCARRA ROSSEL, R. A.; WALVOORT, D. J. J.; MCBRATNEY, A. B.; JANIK, L. J.; SKJEMSTAD, J. O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. Geoderma, Amsterdam, v. 131, n. 1-2, p. 59–75, 2006.

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

WILDING, L. P.; DREES, L. R. Spatial variability and pedology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F. (eds). **Pedogenesis and soil taxonomy**. I concepts and interactions. New York: Elsevier, 1983. p. 83-116.

CAPÍTULO 2. VARIABILIDADE HORIZONTAL E VERTICAL DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DO SOLO

RESUMO- A compactação do solo tem se destacado a nível mundial como sendo um dos principais fatores limitantes há produção das culturas. Considerando que a subsolagem, prática agrícola que visa solucionar este problema, possui elevado custo operacional além de ocasionar elevada queima de combustível fóssil, faz-se necessário estudos que visam otimizar esta operação. O objetivo deste trabalho foi estudar o potencial da prática da subsolagem em profundidade variada e de forma localizada com base no mapeamento de áreas de manejo específico. A área de estudo localiza-se no município de Guariba (SP), em solo oxissolo e encontra-se sob cultivo de cana-de-açúcar com colheita mecanizada há seis anos. Foram avaliados parâmetros físicos do solo como resistência à penetração, densidade, umidade e textura. A subsolagem localizada e em profundidade variada proporcionou um incremento na capacidade operacional de até 61,7% em relação à operação em área total. Já para o consumo de combustível fóssil houve uma redução de até 57,1%. Conclui-se que esta técnica pode ser utilizada para auxiliar no desenvolvimento de estratégias mais eficazes permitindo a construção de cenários para auxiliar no manejo local sobre a subsolagem.

2.1. INTRODUÇÃO

Problemas com compactação do solo crescem paulatinamente em decorrência do intenso emprego de máquinas no campo, trafegando sem a precisa delimitação de zonas de tráfego e frequentemente, em condições improprias de umidade (KROULIK et al., 2011). Nesse sentido, empresas que fazem uso de técnicas da agricultura de precisão, como tráfego controlado, colhem inúmeros benefícios dentre os quais se destacam a redução na compactação e melhorias na qualidade da lavoura (SILVA et al. 2011; DUNN et al., 2006).

A compactação do solo em decorrência ao tráfego de máquinas causam efeitos agronômicos indesejáveis como decréscimo de produção, aumento da suscetibilidade do solo a erosão e aumento da potência necessária para o preparo do solo (BOTTA et al., 2008; KIBBLEWHITE et al., 2008; BECERRA et al., 2010;

BOTTA et al., 2010). Como forma de controle desses problemas, operações de subsolagem se fazem necessária.

De acordo com SALVADOR et al. (2009) a subsolagem é uma das operações mecanizadas de maior custo e demanda energética por área, sendo o combustível a principal componente que compõem os custos de produção (SIMÕES et. al, 2011). Os custos com combustível continuam sendo um problema mundial na agricultura, levando pesquisadores a buscarem métodos que minimizem seu uso (FERNANDES et al. 2008). Um método possível de utilização é a elaboração de mapas de subsolagem com base em avaliações da resistência do solo a penetração (RP).

Segundo TAVARES-FILHO et al. (2001) um diagnóstico sobre a distribuição espacial da RP torna-se ferramenta importante para o estabelecimento de limites críticos de compactação, abaixo do qual não interfere no crescimento radicular das culturas. Os valores críticos de RP variam em função da espécie. ARSHAD et al. (1996), identificaram valores entre 2 e 4 MPa, porém ressalta-se que a RP apresenta relação direta com o conteúdo de argila e com a umidade do solo. DEXTER (1987) demonstrou que o crescimento de raízes pode ser inibido com valores de RP inferiores a 1 MPa em solos secos; entretanto, com umidade, pode haver crescimento com valores variando entre 4,0 e 5,0 MPa.

A agricultura atual aspira por métodos de detecção rápida e precisa na determinação de propriedades físicas do solo, visto a complexidade e custo dos atuais métodos (MONTANARI et al. 2012). Por ser uma prática simples, rápida e de baixo custo, avaliações de RP podem ser utilizada para determinações do estado físico do solo, apresentando-se como uma importante ferramenta para subsidiar a identificação de zonas específica de manejo nas operações de subsolagem.

A adoção de zonas específica de manejo é uma prática crescente no setor sucroalcooleiro visto a necessidade de otimização das atividades (SILVA et. al. 2011). Operações de subsolagem já são realizadas de forma localizada por algumas usinas do setor, realizando a subsolagem apenas no canteiro de plantio. Esta estratégia preconiza a redução do numero de hastes e menor mobilização do solo, reduzindo significativamente os custos da operação. Apesar de essas iniciativas obterem bons resultados na prática, existe uma lacuna na literatura a respeito da viabilidade econômica e operacional levando-se em conta a variabilidade horizontal e vertical da compactação do solo.

Assim o objetivo deste trabalho é mapear os locais e a profundidade de compactação, procedendo à subsolagem somente em áreas cujo grau de compactação seja restritivo ao crescimento radicular, avaliando a capacidade operacional e consumo de combustível desta operação em relação à subsolagem realizada em área total.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E AMOSTRAGEM

A área de estudo, localiza-se no nordeste do estado de São Paulo, município de Guariba (SP). As coordenadas geográficas são 21° 19' de latitude sul e 48° 13' de longitude oeste. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo mesotérmico com inverno seco (Cwa), precipitação média de 1400 mm e chuvas concentradas no verão.

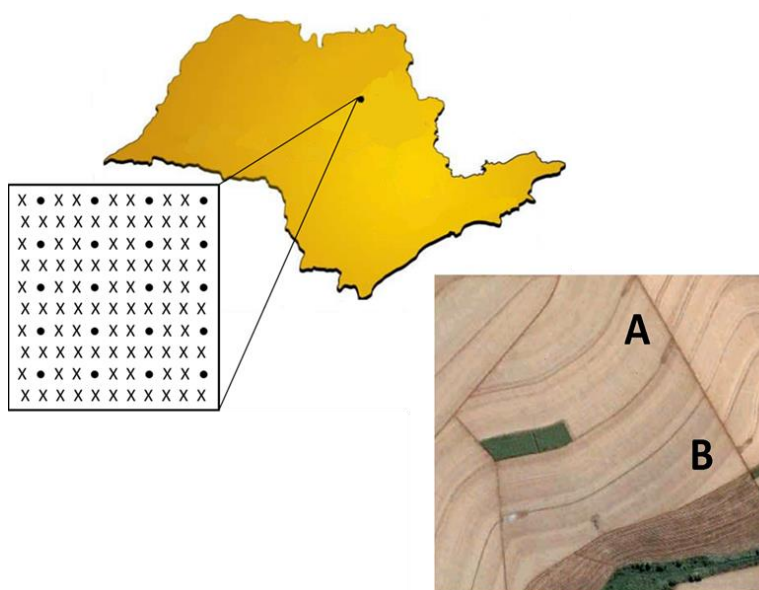


FIGURA 1. Localização da área e malha amostral dos atributos estudados. (X) pontos avaliados de resistência à penetração, (●) pontos avaliados de resistência à penetração, densidade, volume total de poros, umidade e textura.

A vertente estudada apresenta dois tipos de solo, no topo encontra-se o Latossolo Vermelho eutrófico (LVe) e da meia encosta para o sopé o Latossolo Vermelho eutroférico (LVef), ambos sob cultivo de cana-de-açúcar com colheita

mecanizada há seis anos. O mapa de solos foi elaborado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) na escala de 1:12.000. (FIGURA 1)

2.2.2 COLETA E AVALIAÇÃO DOS ATRIBUTOS DO SOLO

Para avaliar a resistência à penetração (RP) foi construída uma malha com pontos georeferenciados em intervalos regulares de 30 m, totalizando 111 pontos em aproximadamente 10 ha (em cada área). Foi utilizado o penetrógrafo PNT-Titan®, construído conforme a norma ASAE S313.3 (ASAE, 1999). Foram feitas avaliações no perfil de 0 - 0,4 m no qual a RP foi mensurada a cada 0,05 m, sempre a uma distância de 0,1 m do centro da planta.

Para os atributos de densidade, umidade, granulometria e suscetibilidade magnética, foi construída uma malha com pontos georeferenciados em intervalos regulares de 70 m, totalizando 20 pontos (em cada área). As amostras foram coletadas nas profundidades de 0,0 - 0,1 / 0,1 - 0,2 / 0,2 - 0,3 / 0,3 - 0,4 m.

As amostras já secas passaram por peneiras de malha com diâmetro de 0,002 m para análises granulométricas. A granulometria foi determinada de acordo com a Lei de Stokes, pelo método da pipeta com solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico e agitação mecânica em baixa velocidade por 16 horas, seguindo a metodologia proposta pela EMBRAPA (1997).

A determinação do volume total de poros (VTP), macroporos e microporos foram realizadas em amostra indeformada de solo, retiradas com anel volumétrico no campo, e determinado na mesa de tensão. A densidade do solo foi determinada de acordo com a metodologia preconizada pela EMBRAPA (1997). A umidade do solo foi avaliada indiretamente com o sensor TDR (Time Domain Reflectometer) - Hydrosense system. A suscetibilidade magnética foi analisada pelo medidor MS2, de Bartington Instruments Ltd.

2.2.3. ANÁLISES ESTATÍSTICAS E GEOESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos à análise estatística para determinação da média, máximo, mínimo e coeficiente de variação utilizando o programa Minitab 14 MINITAB et al. (2000).

A análise da variabilidade espacial foi feita por meio da geoestatística (VIEIRA et al., 1983), utilizando-se o variograma, com base nas pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca.

O variograma experimental foi escolhido com base no número de pares envolvidos no cálculo da semivariância dos primeiros “lags”, presença de patamar claramente definido e valor do R^2 para o modelo ajustado e validação cruzada (BURROUGH & MCDONNEL 2002). Os valores foram interpolados por meio da krigagem ordinária e foram usados para construção do mapa de compactação por meio do programa SURFER (1999).

2.2.4. SUBSOLAGEM

Embasado pela literatura, neste estudo adotou-se o valor de RP igual a 4 MPa como índice limite a inibição do crescimento radicular. Assim a prática da subsolagem só foi realizada em locais, e em profundidades, cuja RP apresentava valores iguais ou superiores a 4 MPa, conforme pode ser ilustrado pela Figura 2.

RP MPa (Profundidade cm)					Subsolagem
(0-10)	(10-20)	(20-30)	(30-40)	(40-50)	Profundidade
0,7242	3,0933	3,2478	3,6477	4,5825	50
0,3789	2,4194	2,6345	2,7452	3,4905	0
0,511	2,3102	4,1207	3,6947	3,2379	30
1,7094	6,0715	4,6147	3,8286	3,1298	30
0,3662	2,1868	4,1572	4,0015	4,2092	50
2,7692	5,5284	5,2729	4,2779	3,0232	40
0,5684	4,2947	2,6921	3,3937	3,0707	20
0,5937	3,6995	4,3851	3,8918	3,5017	30

FIGURA 2. Esquema da Krigagem ordinária na identificação da profundidade de subsolagem

Foram realizadas as operações de subsolagem convencional e localizada (apenas na linha de plantio) conforme ilustra a Figura 3. Ambas foram realizadas em profundidade fixa e variável de acordo com a distribuição espacial da RP totalizando quatro experimentos com 2,5 ha cada.

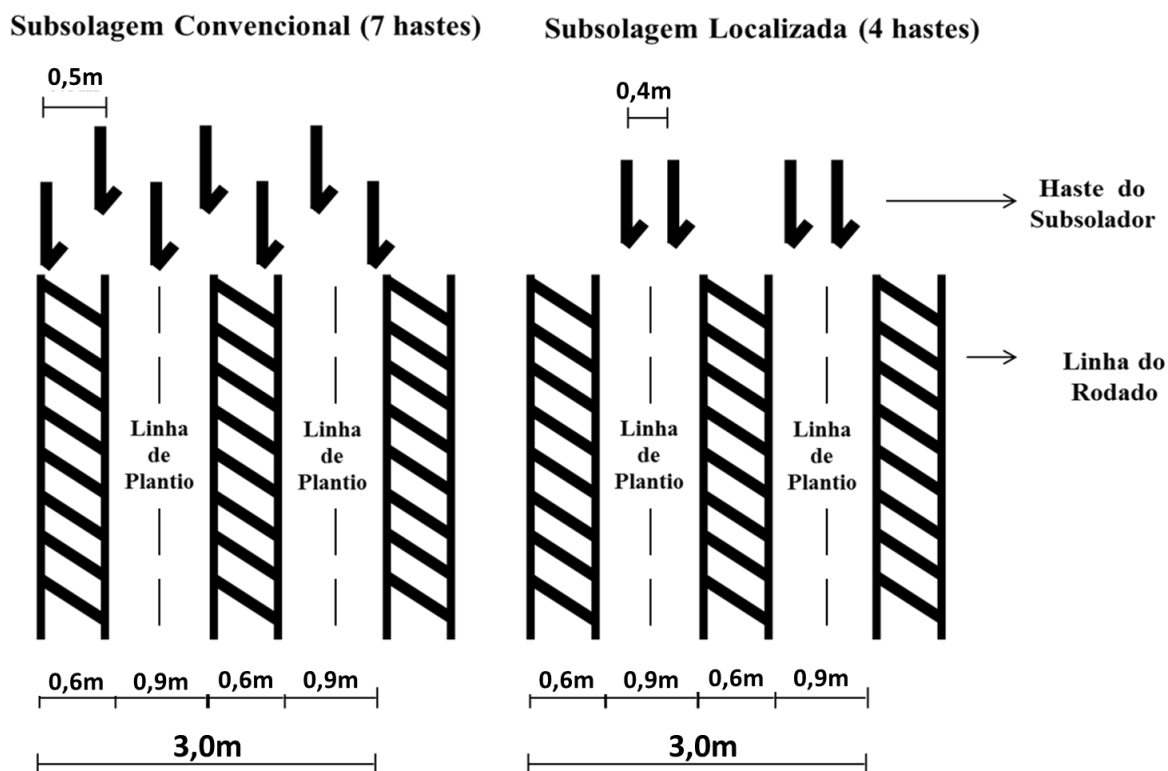


FIGURA 3. Esquema da Subsolagem convencional e localizada.

O trator utilizado foi um CASE MAGNUM 305 cv, munido do sistema de piloto automático TRIMBLE. Em todas as operações foram avaliadas a capacidade operacional calculada segundo a razão entre área trabalhada pelo tempo gasto. O consumo de combustível foi obtido com o auxílio de um Fluxômetro da marca “Flowmate” oval, modelo M-III, instalado próximo ao filtro de combustível, com precisão de 0,1 mL conforme descrito por MAHL (2004). Em posse dos resultados sobre a demanda energética, foi realizado conforme FIGUEIREDO & LA SCALA (2011) uma conversão do consumo em equivalente a emissão de CO₂.

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando a granulometria das áreas em estudo, observa-se que apesar da proximidade geográfica e a aparente semelhança entre as áreas, existem diferenças significativas. O teor de argila presente no L_{Ve}f foi significativamente maior em todos os perfis estudados, porém a resistência do solo a penetração (RP) sempre apresentou os valores máximos no L_{Ve}. Estudos indicam que a RP apresenta relação direta com o conteúdo de argila e inversa com a umidade (ROSOLEM et al.,

1999), entretanto no presente estudo os solos com maiores teores de argilas não foram acompanhados pelos maiores valores de RP, evidenciando que tão importante quanto o teor de argila presente no solo é fundamental observar a composição dos minerais constituintes na fração argila.

Observando o comportamento da suscetibilidade magnética do solo, conclui-se que os minerais da fração argila dos solos estudados apresenta clara distinção, devido a variações significativas que este atributo apresentou. Todas as profundidades obtiveram diferenças significativas das médias sendo que o L_{Vef} foi o solo que apresentou os maiores teores de SM, destaca-se à proximidade geográfica das áreas, aproximadamente 560 metros. Segundo MATHÉ et al. (2006) a SM pode ser utilizada como micro indicador das condições do solo.

Os valores de suscetibilidade magnética são proporcionais à concentração de óxidos (SOUZA JUNIOR et al. 2010) e são utilizados em diversos estudos (MULLINS, 1977; DEARING, 1994), pois seus valores são altamente sensíveis e podem detectar a presença desses minerais em níveis de detecção bem abaixo daqueles encontrados na difração de raios-X (DRX) e na espectroscopia Mössbauer (MAHER, 1986).

Estes comportamentos da fração argila do solo refletem em os outros atributos, podendo inferir sobre o potencial de compactação da área. Dentre os atributos mais utilizados para inferir sobre compactação do solo destacam-se a densidade, volume total de poros (VTP) e resistência do solo a penetração (RP). Os valores de densidade do solo e VTP apresentaram semelhança na distribuição em todas as profundidades (Tabela 1), porém o mesmo não se observa em relação à RP.

TABELA 1. Média, mínimo, máximo e coeficiente de variação dos atributos.

Atributos	LVe							
	Média	Mínimo	Maximo	CV	Média	Mínimo	Maximo	CV
	Profundidade 0,00-0,10m				Profundidade 0,10-0,20m			
SM	2728,80	2463,00	3004,00	5,32	2725,75	2391,00	3042,00	5,89
RP	1,12	0,23	4,43	111,18	3,68	0,61	11,36	63,44
Ds	1,26	1,00	1,40	8,37	1,26	1,00	1,40	7,89
VTP	55,30	49,00	65,00	6,77	54,65	51,00	61,00	4,65
Micro	40,35	34,00	48,00	8,25	40,95 ^a	35,00	48,00	7,66
Macro	14,80	9,00	30,00	35,73	13,70	7,00	27,00	34,89
A.T.	189 ^a	145	212	10,93	183,5	145	230	13,16
A.F.	64	46	70	12,70	58,5	47	73	14,87
A.M.F.	125	97	148	12,17	120,5	96	164	15,26
Silte	343,75	292,5	419,5	10,47	352,25	148	519,5	18,97
Argila	470	381,5	554,5	9,32	463,25	281,5	649	14,87
Atributos	Profundidade 20-30				Profundidade 30-40			
SM	2679,68	2289,00	2993,00	7,46	2718,20	2350,00	3096,00	6,93
RP	3,74	0,70	6,01	35,64	3,96	0,83	6,52	33,98
Ds	1,24	1,10	1,30	7,09	1,25	1,10	1,40	7,59
VTP	55,15	50,00	60,00	5,14	54,85	49,00	60,00	5,10
Micro	40,05	35,00	44,00	5,87	41,00	37,00	45,00	6,43
Macro	15,05	11,00	24,00	21,50	13,85	10,00	22,00	23,57
A.T.	180	146	219	12,62	182	142	232	12,41
A.F.	56	43	68	14,86	57	43	68	14,02
A.M.F.	120	93	157	14,52	120,5	92	172	14,86
Silte	351,75	314,5	481	11,36	349,5	275	431	10,36
Argila	476,5	304	505,5	10,95	475,5	384	550	8,62
Atributos	LVef							
Atributos	Média	Mínimo	Maximo	CV	Média	Mínimo	Maximo	CV
	Profundidade 0,00-0,10m				Profundidade 0,10-0,20m			
SM	4936,00	3770,00	6183,00	13,28	4950,30	3773,00	6274,00	13,88
RP	0,98	0,04	2,77	75,48	3,31	0,20	5,53	35,50
Ds	1,28	1,10	1,40	6,99	1,29	1,10	1,50	7,07
VTP	52,95	49,00	58,00	5,22	53,05	48,00	58,00	4,99
Micro	38,20	36,00	41,00	3,25	38,65	37,00	41,00	3,28
Macro	14,95	9,00	21,00	23,42	14,40	10,00	21,00	22,91
A.T.	121	97	163	14,18	118,5	99	163	12,88
A.F.	39,5	30	82	32,68	39	30	79	31,06
A.M.F.	77,00	60	90	9,63	78	64	88	8,80
Silte	189,75	130,5	312	25,24	201,5	159	306,5	18,52
Argila	663,5	559	741,5	7,83	667,5	594,5	733	5,42
Atributos	Profundidade 0,20-0,30m				Profundidade 0,30-0,40m			
SM	4958,15	3854,00	6389,00	14,27	5004,75	3978,00	6735,00	14,70
RP	4,09	0,28	5,99	32,77	3,97	0,15	6,15	33,45
Ds	1,30	1,20	1,40	5,86	1,28	1,20	1,40	5,44
VTP	52,15	48,00	57,00	4,41	52,45	49,00	56,00	4,17
Micro	37,65	34,00	41,00	4,16	37,35	35,00	39,00	3,39
Macro	14,45	10,00	23,00	20,64	14,95	10,00	20,00	19,10
A.T.	115,5	47	155	18,89	115	28	162	22,04
A.F.	38,5	16	74	35,47	38,5	5	81	40,36
A.M.F.	75	30	82	14,86	76,5	20	84	18,22
Silte	187	154	301	20,16	196,5	150,5	314,5	19,85
Argila	689,75	600	735,5	4,73	681,75	620,5	733	4,17

SM- suscetibilidade magnética ($10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$); RP- resistência do solo a penetração (MPa);

Ds – densidade do solo (g cm^{-3}), VTP- volume total de poros (%); Micro – microporosidade;

Macro – macroporosidade; A.T – areia total; A.F. – areia fina; A.M.F. – areia muito fina

Com exceção da camada superficial, verifica-se que o valor médio da RP em todas as profundidades está próximo, porém os valores de máximos e mínimos apresentam variações significativas evidenciando que a distribuição espacial da camada compactada não apresenta de forma homogênea no perfil do solo (Tabela 1). A RP, seguida dos macroporos foi a que apresentou maior coeficiente de variação (CV). Estes resultados indicam que o levantamento de solo, utilizando valores médios, não representa adequadamente a variabilidade espacial deste atributo no solo. SOUZA et al. (2004) afirmam que o CV serve como uma prévia do conhecimento sobre a variabilidade espacial.

A variabilidade espacial, horizontal e vertical, de diversas propriedades do solo, inclusive da RP, é dependente de fatores de formação do solo e fatores relacionados com o manejo (SOUZA et al., 2001). Áreas pedologicamente idênticas podem apresentar variabilidade distinta em atributos, quando submetidas às diferentes práticas de manejo (CORÁ et al., 2004). Assim, para um manejo racional e eficaz, é imprescindível um estudo do comportamento da distribuição espacial da RP, visto que este atributo tem sido amplamente utilizada para quantificar o grau de compactação do solo por apresentar melhores correlações com o crescimento radicular (STONE et al., 2002; TAYLOR 1963), ser sensível ao manejo, ter relações diretas com a produtividade das plantas (BENGOUGH et al., 2001; LETEY, 1985).

Desta forma, conclui-se que a identificação da distribuição espacial da RP, pode ser uma importante ferramenta para o estudo da compactação, auxiliando no manejo do solo. CANILLAS & SALOKHE (2002) apontam a compactação dos solos como sendo um dos principais causadores da degradação dos solos agrícolas.

A utilização da geoestatística para caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo, associada a outras técnicas de tomada de decisão são importantes para o refinamento das práticas de manejo e a avaliação dos efeitos da agricultura sobre a qualidade ambiental LIMA et al., (2009). Autores têm estudado a delimitação de zonas específicas de manejo com base no uso da geoestatística (SIQUEIRA; MARQUES JUNIOR; PEREIRA, 2010; MONTANARI et al. 2012).

Por meio de ferramentas da geoestatística, foi constatada dependência espacial no LVe conforme pode ser observado na Figura 4, entretanto no LVe_f não foi constatada dependência espacial. O LVe_f localiza-se na encosta do perfil estudado, e por se encontrar uma área de deposição de sedimentos, os dados

evidenciam uma maior variabilidade dos atributos, indicando que para esta posição da paisagem a malha de amostragem deve ser mais adensada, aumentando assim, o numero de pontos.

GESSLER et al. (2000) e KRAVCHENKO & BULLOCK (2002) relatam que a topografia (estudo do relevo), é um fator importante na distribuição espacial dos atributos do solo e que interfere no desenvolvimento vegetal. A influencia da curvatura do relevo sobre a variabilidade dos atributos dos solos é confirmada por vários autores (NIZEYIMANA & BICKI, 1992; HAMMER et al., 1995; LANDI et al., 2004; MCBRATNEY et al., 2002; PENNOCK et al., 2003; MONTGOMERY, 2003; MONTANARI et al., 2005; TOMER et al., 2006; CAMARGO et al., 2008).

Analisando o variograma obtido no LVe, observa-se clara dependência espacial da RP na área em estudo, concluindo que este atributo não se apresenta de forma aleatória no perfil do solo. Nota-se o patamar bem definido e próximo da linha da semivariância, indicando a ausência de tendência nos dados SIQUEIRA et al (2010a).

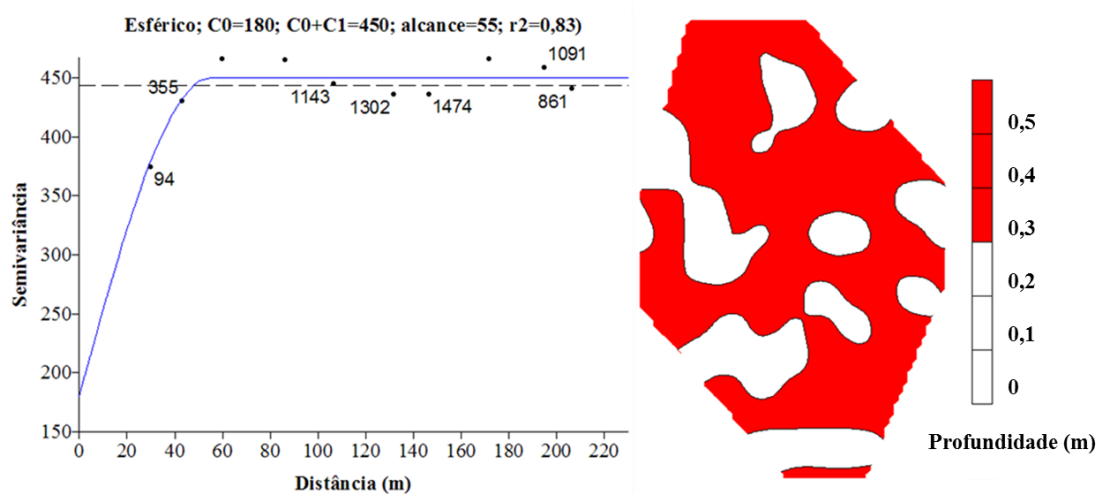


FIGURA 4. Variograma e mapa de distribuição espacial da RP.

Por meio do monitoramento da RP no perfil do solo foram identificados os locais onde este atributo apresentou valor igual ou superior a 4 MPa, possibilitando mapear as áreas bem como as profundidades que demandam a operação de subsolagem (FIGURA 4). Desta forma torna-se possível o estabelecimento de zonas específicas de manejo onde a operação somente faz necessária em locais e em profundidade previamente identificada. KICHLER et al. (2007) concluíram que

realizar a subsolagem a uma menor profundidade, aumenta a eficiência e diminuem os custos desta operação, visto a redução significativa da força de tração.

Visando propiciar condições físicas adequadas para um perfeito desenvolvimento da cultura, é imprescindível que as camadas sub superficiais não apresentem impedimento mecânico ao crescimento radicular. Assim uma localização segura das zonas de compactação no perfil do solo faz-se necessária. Estudos apontam que é possível identificar a profundidade da camada compactada, visto que a variação da RP não se encontra de forma aleatória no perfil do solo, ABREU (2000) observou que a RP apresentou ausência de dependência espacial na camada que se estendia da profundidade de 0,075 m a 0,175 m. Porém na profundidade de 0,025 m a 0,05 m e acima 0,30 m, os valores de RP apresentaram dependência espacial e ajustou-se o modelo exponencial e esférico, corroborando com o estudo em questão.

Considerando que a subsolagem é uma operação que objetiva a descompactação do solo à profundidade superior a 0,30 m (BOLLER 2001), camada na qual a variabilidade da RP mostra-se possuir clara dependência espacial, o estudo prévio da RP apresenta-se como importante ferramenta para subsidiar zonas de manejo localizada. LANÇAS (1988) e YSHIMINE (1993), estudando o desempenho de subsoladores com diferentes quantidades de hastes, e com velocidade de deslocamento constante em solos argilosos, constataram que a força de tração aumentou significativamente em função do número de hastes utilizadas.

Além do número de hastes utilizadas outro parâmetro determinante para o desempenho da operação é a profundidade de trabalho. Conclui-se que a velocidade de deslocamento de um subsolador é influenciada de maneira significativa pela profundidade de trabalho (BICUDO, 1990), e ambas interferem na variação da força de tração (LANÇAS, 1988; YSHIMINE, 1993). Em experimento realizado por SPOOR & GODWIN (1978), ocorreu um aumento de aproximadamente 96% na força de tração necessária para tracionar um subsolador quando a profundidade de trabalho aumentou de 0,35 para 0,42 m.

A operação da subsolagem foi realizada de acordo com as áreas delimitadas no mapa apresentado (FIGURA 4) e os resultados são expostos na Tabela 2

TABELA 2. Capacidade operacional e consumo de combustível.

Subsolagem		C.O (ha/h)	Consumo (L/ha)	Kg CO ₂ / ha ^a	Área subsolada (%)
Subsolagem	Prof. Fixa (40cm)	1,28	36,8	147,98	84
Convencional*	Prof. Variável (30cm)	1,42	34,2	137,52	16
Subsolagem	Prof. Fixa (40cm)	2,04	20,8	83,64	73
Localizada**	Prof. Variável (30cm)	2,07	15,8	63,53	27

CO – capacidade operacional; a – valores de equivalente de CO₂ emitido calculados com base em FIGUEIREDO et al. (2011).

Para melhor visualizar os contrastes entre as distintas operações foram confrontados os dados obtidos em cada modalidade de subsolagem e os resultados foram expostos na Tabela 3.

TABELA 3. Comparação geral dos métodos de trabalho.

Métodos	Incremento da CO (ha/h)	Redução de Combustível (L/ha)	Redução de CO ₂ (kg/ha)
SCF ¹ x SCV ²	10,9%	7,1%	7,1%
SLF ³ x SLV ⁴	1,5%	24,0%	24,0%
SCF x SLF	59,4%	43,5%	43,5%
SCV x SLV	45,8%	53,8%	53,8%
SCF x SLV	61,7%	57,1%	57,1%

¹Subsolagem convencional profundidade fixa; ² Subsolagem convencional profundidade variada; ³ Subsolagem localizada profundidade fixa; ⁴ Subsolagem localizada profundidade variada. CO – capacidade operacional.

De acordo com a Tabela 3 observa-se que a operação da subsolagem localizada quando comparada com a convencional, ambas em profundidade fixa, possui além de uma economia de 43,5% em litros de combustível, um incremento de 59,4% na capacidade operacional. Estudos demonstram que o número de hastes tem influência no consumo específico operacional, apresentando menor desempenho conforme se aumentou o número de hastes (LANÇAS 1988 & BICUDO 1990).

O desempenho de maior contraste obtido foi ao confrontar a mobilização total do solo ao método da subsolagem localizada. Os valores quando ocorre à operação apenas na linha de plantio atingem aproximadamente 61,7% em incremento na capacidade operacional e 57,1% em redução no consumo de combustível. (Tabela 3). Os resultados obtidos quando realizada a operação em menor profundidade de trabalho mostram queda significativa no consumo de combustível. Observando à subsolagem localizada, verifica-se uma redução de 24% no consumo. Ressalta-se que a área mobilizada em menor profundidade (0,30 m) corresponde apenas 16% da área trabalhada na subsolagem convencional e 27% na localizada, valores estes que são determinados em função do tipo de solo e manejo estabelecido.

Estudando o desempenho energético de subsoladores KICHLER et al. (2007) observaram que ocorreu aumento no consumo de combustível de 20% e incremento na força de 120% quando se aumentou a profundidade de 0,23 m para 0,35 m. RAPER (2005) verificaram redução no consumo de combustível da ordem de 43% e 27%, quando a profundidade da operação foi de 0,25 e 0,35 m, respectivamente, comparado à profundidade de 0,45 m. O mesmo autor alerta que se pode conseguir redução do consumo de combustível trabalhando com profundidades variáveis, de acordo com a camada do solo a ser descompactada.

Os resultados apresentados ratificam a importância da acurácia na determinação da profundidade da camada compactada no perfil do solo, visto que acima da qual ocorrerá aumento considerável na demanda de energia para executar a operação. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por SPOOR & GODWIN (1978) e BICUDO (1990).

Além dos benefícios já descritos, os resultados apresentados tornam-se relevantes no âmbito ambiental devido ao elevado potencial de mitigação de CO₂. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) a área cultivada com cana-de-açúcar que será colhida na safra 2013/14 está estimada em 8.893 milhões de hectares. Segundo a União da Indústria de Cana de Açúcar (UNICA) atualmente a taxa de reforma e expansão dos canaviais gira em torno de 18%, variação esta devido ao clima, manejo varietal e as dificuldades financeiras encontradas no setor. Assim estima-se cerca de 1,6 milhões de hectares anualmente reformados, área esta que necessariamente devera passar por operações de preparo de solo e operações de descompactação do solo, incluindo a subsolagem.

Como já apresentado na Tabela 3, no estudo em questão, à diferença entre o sistema convencional de preparo do solo em relação ao método de subsolagem localizada alcançou uma economia de até 21 L/ha de combustível. Assim além da otimização da operação e dos recursos disponibilizados, os resultados apontam um benefício ambiental de valor incontestável, devido a menor queima de combustível fóssil. Segundo (FIGUEIREDO & LA SCALA, 2011) para cada litro de diesel que se deixa de consumir são deixados de emitir 4,021 kg CO₂.

Segundo a Assessoria de Gestão Estratégica (AGE/MAPA) a média percapta brasileira de emissão de CO₂ é aproximadamente 12,8 t/ano. Assim extrapolando os valores obtidos para toda área de reforma do setor sucroalcooleiro brasileiro, conclui-se que a taxa de mitigação de CO₂ equivale à emissão de 10.555 habitantes/ano, valor este considerando apenas a diferença de consumo.

Somar esforços para reduzir as emissões dos setores de energia e do desmatamento, é também uma prioridade para implementar programas inovadores que promovam a mitigação nos setores agrícola e pecuário (CERRI et. al., 2009). Neste sentido, HUNT (1995) afirma que pequenas melhorias no gerenciamento das máquinas podem trazer maior retorno que grandes economias em outros custos de produção.

2.4. CONCLUSÃO

A subsolagem localizada e com profundidade variada apresentou uma capacidade operacional 61,7% maior do que a convencional, além de economizar 57,1% no consumo de óleo diesel e reduzir a taxa de emissão de equivalente em CO₂ na mesma proporção. O mapeamento com base em áreas de manejo específico apresentou bons indicadores quanto à métrica da sustentabilidade: menor consumo de energia e menor emissão de CO₂.

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, L.S. Propriedades hídricas e mecânicas afetadas por sistemas de manejo e variabilidade espacial de um Argissolo. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, 66p. 2000.

ARSHAD, M.A.; LOWER, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.). Methods for assessing soil quality. Madison, Soil Science Society of America, p.123-141, (Special Publication, 49), 1996.

ASAE. American Society of Agricultural Engineers, ASAE standards: standards engineering practices data. San Joseph, 1999.

BECERRA, A. T.; G. F.; BOTTA, X.; LASTRA BRAVO, M.; TOURN, F.; BELLORA MELCON, J.; VAZQUEZ, D.; RIVERO, P.; LINARES, G. N. Soil compaction distribution under tractor traffic in almond (*Prunus amigdalus* L.) orchard in Almeria Espana, Soil & Tillage Research, 107: 49-56 73,145- 160, 2010.

BENGOUGH, A G.; CAMPBELL, D. J.; O'SULLIVAN, M. F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: Soil environmental analysis: Physical Methods. 2.ed. Nova York: Marcel Dekkee, p.377-403, 2001.

BICUDO, S. J. Subsolador: algumas relações entre profundidade de trabalho, largura das sapatas e número de hastes. Tese (Doutorado em Agronomia) Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 130p,1990.

BOLLER, W. Cuidados com o solo. Revista Cultivar Máquinas, v.5, p.06-08, set/out. 2001.

BOTTA, G. F.; TOLON BECERRA, A.; LASTRA BRAVO, X.; TOURN, M. Tourn Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in rgentinean pampas. Soil & Tillage Research, 110: 167 – 174, 2010.

BOTTA, G.F.A.; TOLON BECERRA, F.; BELLORA TOURN. Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes Soil & Tillage Research, 103: 381 – 386, 2008.

BURROUGH, P.A., MCDONNEL, R.A. Principles of Geographical Information Systems, 2000.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; FREDERICK, J.R. Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. Soil and Tillage Research, v.68, p.49-57, 2002.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas

do relevo. II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. Rev. Bras. Ciênc. Solo 32, 2279-2288, 2008.

CERRI, C. C. et al.; Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock, Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.), v.66, n. 6, p.831-843, 2009.

CORA, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T. and BERALDO, J. M. G.. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. Rev. Bras. Ciênc. Solo [online]. 2004, vol.28, n.6, pp. 1013-1021. ISSN 0100-0683

GESSLER, P.E.; O.A. CHADWICK, F.; CHAMRAN, L.; ALTHOUSE, K.; HOLMS. Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes. Soil Sci. Soc. Am. J. 64, 2046–2056, 2000.

DEARING, J.A. Environmental magnetic susceptibility. Using the Bartington MS2 system. England: British Library, 104p.,1994.

DUNN, P. K., POWIERSKI, A. P., & HILL, R. (2006). Statistical evaluation of data from tractor guidance systems. Precision Agriculture, 7, 179–192.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2 ed., pp 212, 1997.

FERNANDES H. C., SILVEIRA, J. C. M. da, RINALDI, P. C. N. Avaliação do custo energético de diferentes operações agrícolas mecanizadas. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1582-1587, set./ out., 2008.

FIGUEIREDO, E. B.; LA SCALA, N.; Agriculture, Ecosystems & Environment, v.144, p.77-85, 2011

HAMMER , R.D.; YOUNG, N.C.; WOLENHAUPT, T.L.; BARNEY T.L.; HAITHCOATE, T.W. Slope Class Maps Form Soil Survey and Digital Elevation Models. Soil Sci. Soc. Am. J. 59:509-519, 1995.

HUNT, D. Farm power and machinery management. 9. ed. Ames: Iowa State University Press, 363 p., 1995.

KIBBLEWHITE M.G.; RITZ K.; SWIFT M.J. Soil health in agricultural systems. Phil. Trans. R. Soc. B.363, 685–701, 2008.

KICHLER, C.M.; FULTON, P.R.J.; RAPER, L.; ZECH, W.C.; MCDONALD, T.P.; BRODBECK, C.J. Spatially monitoring tractor performance to evaluate energy requirements of variable depth tillage and implement selection. In: ASABE Annual

International Meeting, Minneapolis, 2007. Proceedings. St. Joseph: ASABE, Paper Number: 071028, 2007.

KROULIK, M., KVIZ, Z., KUMHALA, F., HULA, J. AND LOCH, T. (2011). Procedures of soil farming allowing reduction of compaction. *Precision Agriculture*, 12, 317-333.

LANÇAS, K. P. Subsolador: desempenho em função de formas geométricas de hastes, tipos de ponteiros e número de hastes. 1988. 171p. Tese (Doutorado em Agronomia) Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1988.

LANDI, A.; MERMUT, A. R.; ANDERSON, D. W. Carbon distribution in a hummocky landscape from Saskatchewan, Canada, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 175–184, 2004.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, New York, v.1, n.1, p.277-294, 1985.

LIMA, Julião S. de S. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um argissolo vermelho-amarelo sob pastagem e vegetação secundária em regeneração natural. *Eng. Agríc.* [online]. 2009, vol.29, n.2, pp. 185-195. ISSN 0100-6916

MAHER, B. Characterization of soils by mineral magnetic measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v.42, p.76-91, 1986

MAHL, Denise et al. Demanda energética e eficiência da distribuição de sementes de milho sob variação de velocidade e condição de solo. *Eng. Agríc.* [online]. 2004, vol.24, n.1, pp. 150-157. ISSN 0100-6916

McBRATNEY, A.; MYNASNY, B.; STEPHEN R.; CATTLE, R.; WILLEM VERVOORT. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Amsterdam, Geoderma* v.109, p.41-73., 2002.

KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. ***Agronomy Journal***, Madison, v. 92, n.1, p. 75-83, 2000.

MINITAB Release, Making Data Analysis Easier: Version 13.1.models. *Comptes Rendus Geoscience* 335, 1121–1130, 2000.

MONTANARI R., SOUZA G. S. A., PEREIRA G. T., MARQUES JR. J., SIQUEIRA D. S., SIQUEIRA G. M. (2012). The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. *Precision Agriculture* 13:542–552

- MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 40, 69-77, 2005.
- MONTGOMERY, D. R. Predicting landscape-scale erosion rates using digital elevation models. *Comptes Rendus Geoscience*. Amsterdam, v. 335, n. 2, p. 1.121–1.130, 2003.
- MULLINS, B.A. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science. *Journal of Soil Science*, v.28, p.223-246, 1977.
- NIZEYIMANA, E.; BICKI, T. J. Soil and soilandscape relationships in the North Central region of Rwanda, East-Central Africa. *Soil Science* 153, 225-236, 1992.
- PENNOCK, D.J. Terrain attributes, landform segmentation, and soil redistribution. *Soil & Tillage Research*, 69:15-26, 2003.
- RAPER, R. L. Agricultural traffics impacts on soil. *Journal Terramechanics*. Oxford, v. 42, n. 3-4, p. 259-280, Mar./Apr. 2005.
- SALVADOR, N. BENEZ, S. H.; MION, R. L. Demanda energética na subsolagem realizada antes e depois de diferentes sistemas de preparo periódico do solo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2501-2505, dez. 2009.
- SALVADOR, Nilson; BENEZ, Sérgio H. and MION, Renildo L.. Consumo de combustível na operação de subsolagem realizada antes e depois de diferentes sistemas de preparo periódico do solo. *Eng. Agríc.* [online]. 2008, vol.28, n.2, pp. 256-262. ISSN 0100-6916.
- SILVA C.B., MORAES, M. A. F., MOLIN J.P (2011) Adoption and use of precision agriculture technologies in the sugarcane industry of São Paulo state, Brazil. *Precision Agriculture*1, 67-81.
- SILVA, V. R. Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 171p., 2003.
- SIMÕES, D.; SILVA, M. R.; FENNER, P. T. Desempenho operacional e custos da operação de subsolagem em área de implantação de eucalipto. *Bioscience. Journal*, Uberlândia, v. 27, n. 5, p. 692-700, Sept./Oct. 2011
- SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; MATIAS, S. S. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. *Soil Use and Management*, Oxford, v.26, p.425-431, 2010a.

SIQUEIRA, D.S.; MARQUES JR.; J., PEREIRA, G.T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. *Geoderma* v. 155, 55-66, 2010.

SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S.; VILARI, C. C.; HOEPERS, A. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.40, n.3, p.513-519, mar, 2010

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

SOUZA, Z.M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta, em Selvíria, MS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.699-707, 2001.

SPOOR, G.; GODWIN, R. J. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Bedfordshire, v.23, p.243-258, 1978.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, A. A. J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6, p.207-212, 2002.

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

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.C.; GUIMARÃES, M.F. & FONSECA, I.C.B. Resistência do solo á penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:725-730, 2001.

TAYLOR, H. M.; GARDER, H. R. Penetration of cotton seedlings taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. *Soil Science*, Baltimore, v.96, p153-156, 1963.

TOMER, M.D.; CAMBARDELLA, C.A.; JAMES, D.E., MOORMAN, T.B. Surface-Soil Properties and Water Contents across Two Watersheds with Contrasting Tillage Histories. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 620–630, 2006.

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

YSHIMINE, P. Avaliação de algumas forças que atuam em um subsolador utilizado no preparo de solo agrícola. Tese (Doutorado em Agronomia) Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 94p., 1993.

CAPITULO 3. RELAÇÃO DA MINERALOGIA E SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA COM A QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

3.1. INTRODUÇÃO

Tão importante quanto à compreensão da variabilidade espacial da compactação do solo é o esclarecimento da sua relação de causa e efeito com a mineralogia, visto que estudos indicam que esta relação interfere no comportamento da qualidade física dos solos (STRAUSS et al., 1997; FERREIRA et al., 1999a,b; PEDROTTI et al., 2003).

Nos solos tropicais os principais minerais que influenciam na qualidade física dos solos, bem como retenção e distribuição da água, nutrientes, calor e gases são: caulinita, gibbsita, goethita e hematita (SCHWERTMANN & KÄMPF, 1985; GHIDIN et al., 2006a,b; CAMARGO et al., 2008b; CAMARGO et al., 2013). A participação dos óxidos de ferro na constituição de um solo pode conferir propriedades físicas desejáveis como a permeabilidade a água e resistência à erosão (ALVES, 2002). Segundo VITORINO et al. (2003) em estudo aos Latossolos e Argissolos da Região Sudeste do Brasil, a estabilidade dos agregados do solo de tamanhos maiores são influenciados positivamente pela gibbsita, sendo que a caulinita promove o efeito inverso.

FERREIRA et al. (1999a), estudando a influência da mineralogia da fração argila em atributos físicos de Latossolos, verificaram que a caulinita e gibbsita são os constituintes mineralógicos responsáveis pelo desenvolvimento da estrutura dos Latossolos, sendo que em Latossolos caulíníticos apresentaram maior densidade do solo e menor estabilidade de agregados em água, macroporosidade e permeabilidade, quando comparados a Latossolos gibbsíticos. Dessa forma os minerais são importantes na agregação do solo e afetam a densidade do solo (D_s), apresentando correlação positiva entre caulinita e D_s . O inverso ocorre com a gibbsita (FERREIRA et al., 1999b; PEDROTTI et al., 2003; GUIDIN et al., 2006b).

A apesar de pesquisas indicarem importantes relações entre a mineralogia com a qualidade física dos solos, a falta de informação e baixa aplicabilidade da mineralogia nas relações de causa e efeito estão relacionadas à complexidade e custo das análises mineralógicas (CAMARGO, 2013). Uma das alternativas para

solucionar esses problemas é a utilização de atributos que sejam co-variativos da mineralogia do solo e possam ser utilizados na quantificação indireta dos óxidos de ferro e alumínio.

Pesquisas indicam que a suscetibilidade magnética (SM) apresenta como ferramenta importante na quantificação indireta de minerais, atributos físicos e químicos do solo e atributos da planta (SIQUEIRA et al., 2010; CORTEZ et al., 2011; CAMARGO, 2013). A compreensão da relação de causa efeito entre a mineralogia e suscetibilidade magnética com a qualidade física dos solos permite que os minerais possam ser utilizados como indicadores pedogenéticos (KÄMPF & CURI 2000), auxiliando na identificação de áreas com diferentes potencias de compactação do solo. Alguns autores (SCHACHTSCHABEL et al. 1998; MAHER; THOMPSON 1999) afirmam que a SM é sensível às variações dos fatores e processos de formação do solo, e portanto tem potencial como atributo indicador da presença e ambientes de formação de minerais com expressão magnética.

Nesse sentido, a identificação da espacialização dos teores dos minerais da fração argila, levando em consideração ferramentas de técnicas indiretas como SM, apresenta-se como importante ferramenta para auxiliar no entendimento da relação de causa e efeito entre esses minerais e a variação do potencial de compactação do solo. Portanto, o objetivo deste trabalho é esclarecer a relação da mineralogia com a qualidade física do solo utilizando a suscetibilidade magnética na identificação de áreas com diferentes potencias de compactação do solo.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

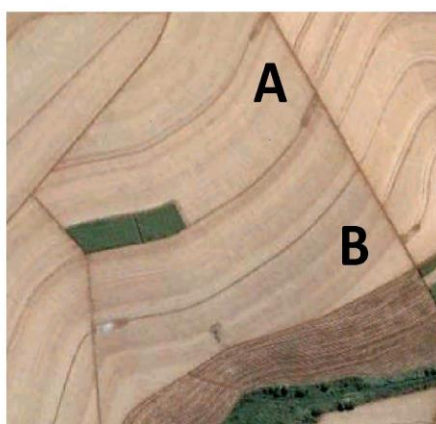
3.2.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área em estudo localiza-se no nordeste do Estado de São Paulo, Município de Guariba (SP), nas coordenadas geográficas são 21° 19' de latitude sul e 48° 13' de longitude oeste, com altitude média de 640 m acima do nível do mar. Situa-se na província geomorfológica Planalto Ocidental Paulista, próxima ao limite das Cuestas Basálticas no divisor litoestratigráfico arenito-basalto. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo mesotérmico com inverno seco (Cwa),

precipitação média de 1.400 mm e chuvas concentradas no período de novembro a fevereiro. A vegetação natural era constituída por floresta tropical subcaducifólia.

A seleção da área foi norteadada pela presença de uma vertente representativa da região. No topo encontra-se o Latossolo Vermelho eutrófico (LVe) e da meia encosta para o sopé o Latossolo Vermelho eutroférico (LVef), ambos sob cultivo de cana-de-açúcar com colheita mecanizada há seis anos. O mapa de solos foi elaborado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) na escala de 1:12.000.

a.



b.

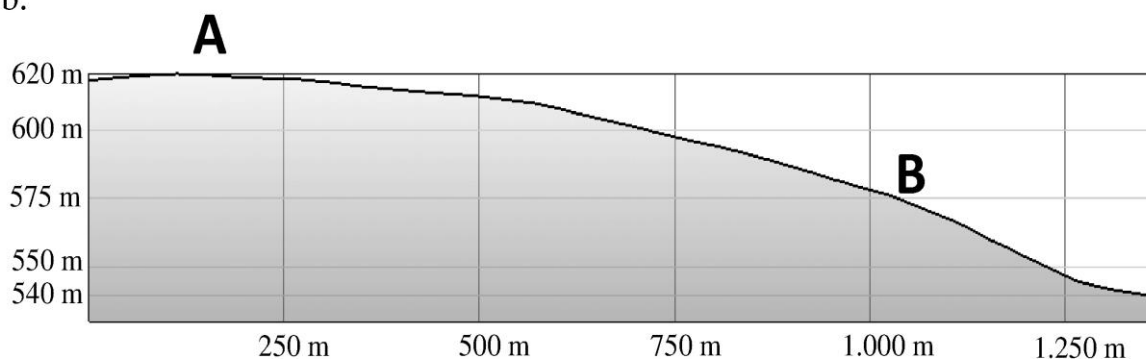


FIGURA 1. Localização das áreas (a) e perfil altimétrico (b).

3.2.2. AMOSTRAGEM E METODOLOGIA DE LABORATÓRIO

Á área possui aproximadamente 20 hectares, sendo 10 ha sob o Latossolo Vermelho eutrófico (LVe) e 10 ha sob Latossolo Vermelho eutroférico (LVef)

(FIGURA 1). Foram avaliados em 20 pontos de cada área e determinados atributos como macroporosidade, microporosidade, densidade do solo, resistência à penetração e suscetibilidade magnética nas profundidades de 0,00 - 0,10m / 0,10 - 0,20m / 0,20 - 0,30m e 0,30 - 0,40m.

No total foram feitas 80 avaliações por área levando-se em conta as diferentes profundidades. Visando o compreender a expressão dos minerais nos pontos de maiores compactações, foram selecionadas as amostras com os cinco maiores valores de densidade do solo e os cinco menores, totalizando 10 pontos para cada área. As análises de ferro ditionito, ferro oxalato, ferro total e mineralogia dos óxidos de ferro e alumínio foram feitas nestas amostras.

3.2.2.1. ANÁLISES FÍSICAS

Para a leitura da resistência utilizou-se o penetrógrafo PNT-Titan®, construído conforme a norma ASAE S313.3 (ASAE, 1999). Esse penetrógrafo possui célula de carga de 1500 N, sendo que as avaliações da RP foram observadas no perfil de 0 – 0,40m.

A granulometria foi determinada de acordo com a Lei de Stokes, pelo método da pipeta com solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico e agitação mecânica em baixa velocidade por 16 horas, seguindo a metodologia proposta pela EMBRAPA (1997).

A determinação do volume total de poros (VTP), macroporos e microporos foram realizadas em amostra indeformada de solo, retiradas com anel volumétrico no campo, e determinado na mesa de tensão. A densidade do solo foi determinada de acordo com a metodologia preconizada pela EMBRAPA (1997). A umidade do solo foi avaliada indiretamente com do sensor TDR (Time Domain Reflectometer) - Hydrosense system.

3.2.2.2. ANÁLISES QUÍMICAS

As formas mais usadas para avaliar os teores de ferro do solo são o ferro total (Fet – Ácido Sulfúrico), óxidos de ferro de maior cristalinidade (Feditionito – Ditionito-Citrato-Bicarbonato) e óxidos de ferro de baixa cristalinidade (Feoxalato - Oxalato de

Amônio). Os óxidos de ferro foram determinados após digestão com H_2SO_4 1:1, para Al_2O_3 e Fe_2O_3 , segundo o método descrito pela EMBRAPA (1997). Os óxidos de ferro livres totais (Feditionito) foram extraídos com ditionito citrato- bicarbonato de sódio (DCB), segundo metodologia de MEHRA & JACKSON (1960), sendo a dosagem do ferro realizada por meio da espectrofotometria de absorção atômica. Os óxidos de ferro foram extraídos pelo oxalato de amônio (Feo), seguindo a metodologia citada por CAMARGO et al. (1986).

3.2.2.3. ANALISES MINERALÓGICAS

A concentração dos óxidos de ferro foi realizada em amostras pulverizadas após tratamento da fração argila. A granulometria foi realizada pelo método da pipeta, empregando uma solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação por 16h, seguindo método modificado da (EMBRAPA, 1997). O tratamento foi seguido pela retirada da areia em peneira de 0,05 mm. A separação da fração silte ocorreu por centrifugação a 1.600 rpm e o tempo da operação foi determinado pela temperatura das amostras no momento da análise. A suspensão de argila foi floculada com HCl concentrado e centrifugada a 2.000 rpm por 2 min. A fração argila foi separada por sedimentação gravitacional; a areia grossa e fina, por tamisação; e o silte, calculado por diferença.

Os minerais da fração argila hematita (Hm), goethita (Gt), caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) foram caracterizados pela DRX. A difração dos raios-X foi realizada em aparelho HGZ, equipado com cátodo de cobalto, filtro de ferro, radiação K (20 mA, 30 kV) e a velocidade de varredura igual a $1^\circ 2\theta \text{ min}^{-1}$, empregados na difração de raios X. Todas as amostras foram preparadas pelo método do pó e peneiradas em malha 0,10 mm.

A caracterização da Hm e da Gt ocorreu após o tratamento da fração argila com NaOH 5 mol L^{-1} ($1\text{g argila } 100\text{ml}^{-1}$ solução), em agitação por 4 horas para concentração dos mesmos, segundo método de Norrish & Taylor (1961), modificado por Kämpf & Schwertmann (1982). Para a correção dos desvios no posicionamento (d) dos reflexos, foi acrescentado às amostras 10% em peso de NaCl moído e peneirado. Para quantificar a Hm e Gt na fração argila promoveu-se a alocação do Fe_2O_3 obtido com DCB nestes minerais, considerando a fórmula química e a relação

$Gt/(Gt + Hm)$. A posição dos picos de NaCl, em cada amostra foi utilizada para corrigir os valores das posições dos picos da Hm e Gt.

O Diâmetro Médio do Cristal (DMC) foi calculado com base na largura à meia altura (LMA) e na posição dos reflexos dos minerais Hm (110) e Gt (110). A LMA foi corrigida com o uso de amostras de itabirito, hematita e quartzo moídas e peneiradas (0,1mm) (SCHULZE, 1984), utilizando-se a equação de Scherrer (KLUG; ALEXANDER, 1954):

$$DMC (A) = (k\lambda 57,3) / (\beta \cdot \cos(\Theta)) \quad [1]$$

Em que, DMC (A) é a distância perpendicular ao plano basal do reflexo (hkl) em angstrom; K é a constante de forma; λ é o comprimento de onda conforme o cátodo usado; 57,3 é a conversão de graus para radiano ($180/\pi$); θ é o ângulo de incidência; $\beta = B - b$, onde β é a LMA corrigida, B a LMA da amostra e b o LMA padrão em grau 2θ . Foi construído um gráfico entre LMA (grau 2θ) e o ângulo de incidência (grau 2θ) para se obter o valor b, correção do alargamento instrumental do aparelho de DRX, já que as LMA das amostras padrão não foram constantes.

A razão $Gt/(Gt+Hm)$ foi obtida após o cálculo das áreas dos reflexos da hematita (012) e goethita (110) nos difratogramas, e nesse caso foi multiplicada a área do pico da Gt (110) pelo valor 0,35, devido a intensidade de 35% da hematita (012) (KÄMPF & SCHWERTMANN, 1998).

O sistema caulinita-gibbsita foi obtido pelo método de análise da fração argila desferrificada, por difração de raios X, pelo método do pó (CAMARGO et al., 1986). O difratômetro utilizado foi o HZG-4/B, empregando-se cátodo de Cu com filtro de Ni e radiação K (20 mA, 30 Kv), com velocidade de varredura empregada de $1^\circ 2\theta \text{ min}^{-1}$. O DMC da Gb e da Ct foi calculado a partir da LMA das reflexões 002 e 001, respectivamente, em amostra desferrificadas (tratadas com DCB). De maneira análoga aos óxidos de Fe, o DMC foi obtido pela equação de Scherrer (equação 1). A relação $Ct/(Ct + Gb)$ foi calculada empregando-se as áreas dos reflexos Ct (001) e Gb (002).

3.2.2.4. SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA

A suscetibilidade magnética (SM) foi analisada pelo medidor MS2, de Bartington Instruments Ltd., o qual foi acoplado a um sensor de laboratório MS2B de

duas frequências. O sensor MS2B é um indutor, que, em conjunto com um capacitor faz parte de um circuito oscilador controlado por corrente que cria um campo com intensidade 80 A m^{-1} (10^{-4} T) e de frequência variada.

Qualquer material ou amostra, principalmente com teor magnético, colocado dentro da influência deste campo (núcleo da bobina) provocará uma modificação na frequência da oscilação. Esta alteração da frequência é transformada numa sequência de pulso (relacionadas ao período do sinal) que são transmitidas via cabo coaxial ao medidor MS2 e convertido a informação “duração do pulso” do sensor em um valor de suscetibilidade. Esse mesmo equipamento foi utilizado por Siqueira et al. (2010b).

3.2.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foram calculados os valores de média, mínimo, máximo e coeficiente de variação. Foram construídos gráfico de regressão linear simples utilizando o programa Statistica versão 7.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observando o solo a campo fica difícil identificar diferenças devido à semelhança que ambos aparentemente demonstram. A aparente igualdade na coloração dos solos a olhos desarmado nos causam um falso sentimento de homogeneidade, porém diferenças podem ser ressaltadas no momento do manejo e principalmente na resposta da planta.

A análise da Tabela 1 permite concluir que no L_{Vef} as condições ambientais foram favoráveis a formação dos minerais de maior cristalinidade (maior teor de Ferro ditonito), e que os minerais de baixa cristalinidade (Ferro oxalato) são encontrados em quantidades menores. Segundo FITSPATRICK & SCHWERTMANN (1982), o maior grau de cristalinidade é evidenciado pelo maior DMC e menor LMA. SCHWERTMANN & CARLSON (1994) relatam que a variação do DMC nos óxidos de Fe é função das diferenças em seus ambientes de formação, taxa de formação dos óxidos de Fe, inibidores de cristalização, como matéria orgânica e idade do mineral.

TABELA 1. Valores de média, mínimo, máximo e coeficiente de variação.

Atributos	Média	Mínimo	Máximo	CV	
	L _{Ve} Profundidade (0 - 0,4m)				
Areia total	183,62	142	232	2,11	
Argila	471,31	281,5	649	1,29	
Cor (0,00-0,10m)	Vermelho escuro acinzentado (10R 3/3, úmido; 10R 3/4 seco)				
Ds	1,28	1,10	1,40	8,04	
RP	4,08	0,15	6,51	37,41	
VTP	53,29	48,56	58,55	5,29	
SM	3654	2350	5393	26,81	
Fe ditionito (g.kg ⁻¹)	132	97,5	178,1	13,20	
Fe oxalato (g.kg ⁻¹)	10,9	0,5	28,5	1,09	
Fe total (g.kg ⁻¹)	170,6	117,6	212	17,99	
LMA	Hm012	0,42	0,35	0,51	11,83
	Gt110	0,76	0,44	1,33	45,68
	Hm110	0,49	0,30	1,09	53,46
	Gt111	0,58	0,26	0,95	35,54
	Ct	0,57	0,37	0,67	19,30
	Gb	0,25	0,19	0,32	16,85
	Hm012	50,89	12,57	81,87	44,82
DMC	Gt110	18,41	7,15	29,64	47,6
	Hm110	33,49	9,04	51,02	44,12
	Gt111	16,59	10,71	26,13	30,96
	Ct	14,90	12,39	22,56	23,98
	Gb	34,39	26,45	42,43	14,90
Razão	Gt/ (Gt+ Hm)	0,13	0,06	0,19	35,22
	Ct/ (Ct+ Gb)	0,32	0,07	0,42	34,66
L _{Vef} Profundidade (0 - 0,4m)					
Areia total	117,5	28	163	2,38	
Argila	675,63	559	741,5	1,57	
Cor (0,00-0,10m)	Vermelho escuro acinzentado (10R 3/2, úmido; 10R 3/3 seco)				
Ds	1,29	1,16	1,47	8,20	
RP	4,05	0,15	6,15	40,27	
VTP	52,51	48,56	55,69	5,44	
SM	4553	3978	5393	9,38	
Fe ditionito (g.kg ⁻¹)	155	129,5	178,1	8,22	
Fe oxalato (g.kg ⁻¹)	10,1	7	14,4	25,55	
Fe total (g.kg ⁻¹)	195,3	135,1	212	11,17	
LMA	Ct	0,52	0,29	0,67	26,90
	Gb	0,31	0,20	0,55	36,94
DMC	Ct	17,62	12,36	28,81	33,19
	Gb	30,02	15,32	42,76	30,07
Razão	Ct/ (Ct+ Gb)	0,28	0,03	0,42	44,82

Ds – densidade do solo (g cm⁻³); RP- resistência do solo a penetração (MPa), VTP- volume total de poros (%); SM- suscetibilidade magnética (10⁻⁸ m³ kg⁻¹); Largura à meia altura (° 2θ); Diâmetro médio do cristal (nm).

O mineral que apresentou o maior grau de cristalinidade é a Gb, sendo que a Ct apresentou valores inferiores. A baixa cristalinidade da Ct é típica para minerais com alto grau de desordem estrutural (HUGHES & BROWN, 1979), provocadas por defeitos no empilhamento das camadas do mineral (crescimento na direção Z) e interestratificação com outros minerais (PLANÇON & ZACARIE, 1990). Nos solos em estudo há maiores cristalinidade para Gibssita, em virtude da redução da cristalinidade da caulinita ser decorrente da presença de Fe na estrutura do mineral (MESTDAGH et al., 1980).

Alguns autores relatam que a formação dos óxidos de Fe requer condições específicas, como temperatura, umidade, pH e matéria orgânica. JÚNIOR & KÄMPF (2005) e KÄMPF & CURI (2000) relatam que a maior homogeneidade das populações de hematita está relacionada com a maior especificidade de sua formação, sendo menos sensíveis às mudanças do meio, ao contrário da goethita. A explicação da menor participação da Caulinita no L_{Vef} explica-se pelo maior teor de Gt geralmente é acompanhado na parte mais baixa da toposseqüência, onde o teor de água for maior, provocando a remoção parcial do Fe (SCHWERTMANN, 1988). Os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio são indicadores pedogenéticos por terem sua formação influenciada pelas condições do ambiente e persistirem a longo tempo no solo. (KÄMPF & CURI 2000).

O valor médio e máximo da RP, diminui do L_{Ve} para o L_{Vef}, entretanto o teor de argila aumenta consideravelmente. Estudos indicam que a RP apresenta relação direta com o conteúdo de argila e inversa com a umidade (ROSOLEM et al., 1999), desta forma observa-se no presente estudo que tão importante quanto o teor de argila presente no solo é fundamental observar a composição dos minerais constituintes na fração argila. De acordo com FERREIRA et al., 1999, a caulinita e gibbsita são os minerais responsáveis pelo desenvolvimento da estrutura dos Latossolos estudados, sendo que a maior densidade do solo é atribuído ao ajuste face a face da caulinita.

A razão Ct/(Ct + Gb), diminui do L_{Ve} para o L_{Vef}, ou seja, do ambiente mais intemperizado para a menos intemperizado. Essa observação coincide com o aumento dos óxidos de Fe no mesmo sentido, ou seja, área com maiores óxidos de ferro são seguidas de menores valores da razão Ct/(Ct + Gb) e, portanto, menos suscetíveis a compactação do solo. Esses resultados corroboram com estudos de

FERREIRA et al. 1999, onde os autores afirmam que a menor concentração de óxidos de ferro e maior concentração do mineral caulinita conferem maior potencial de compactação do solo.

Desta forma torna-se importante o entendimento dos fatores de formação que interfere na espacialização dos minerais da fração argila e a implicação de causa e efeito que o mesmo pode gerar, visto que estudos indicam que esta relação interfere no comportamento da qualidade física dos solos (STRAUSS et al., 1997; PEDROTTI et al., 2003; CAMARGO et al., 2008).

Na FIGURA 2 são apresentados os gráficos de regressão entre os atributos estudados.

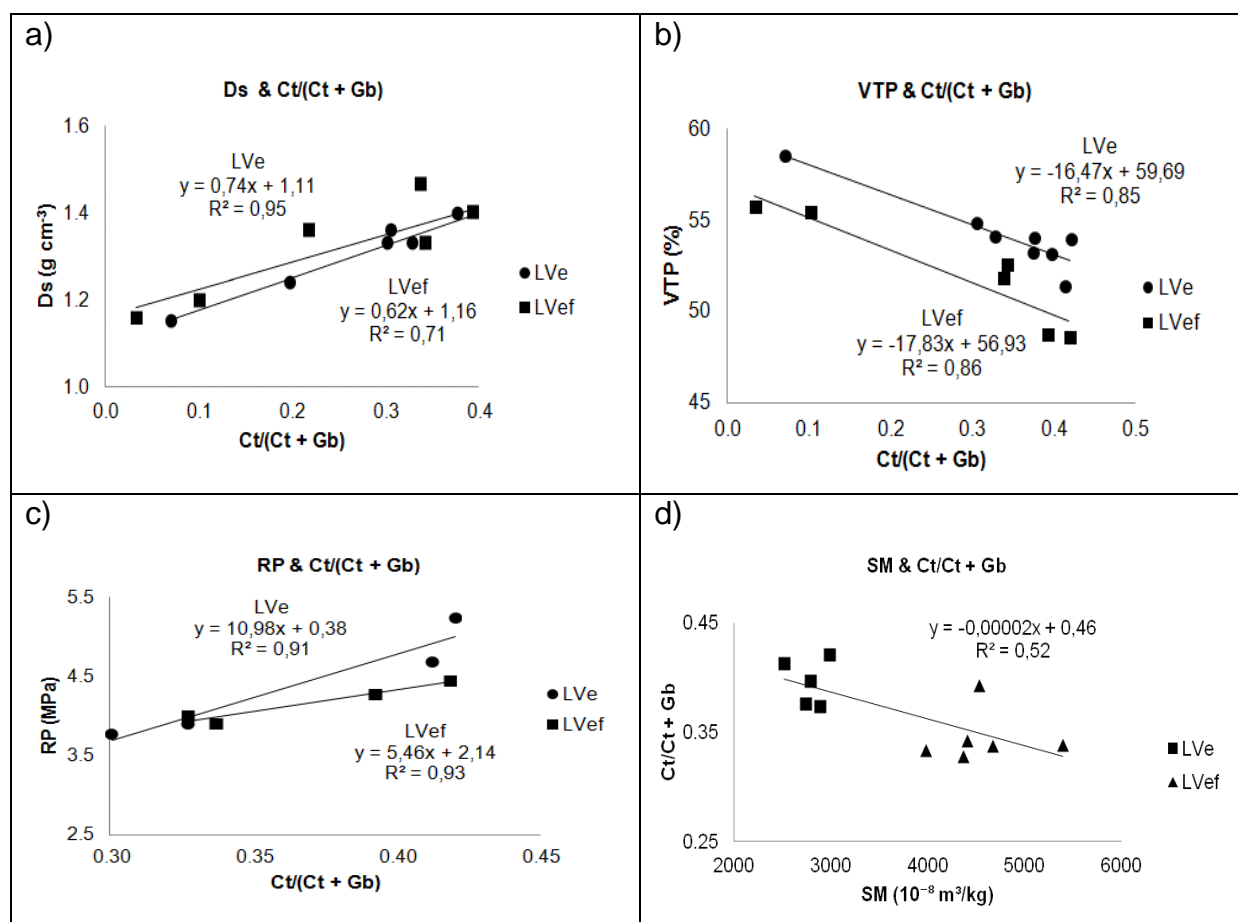


Figura 2. Gráficos de dispersão e regressão linear simples entre os minerais e os atributos: Ds – densidade do solo ($g\ cm^{-3}$); RP- resistência do solo a penetração (MPa), VTP- volume total de poros (%); SM- suscetibilidade magnética ($10^{-8}\ m^3\ kg^{-1}$); razão $Ct/ (Ct + Gb)$, Ferro ditionito (%).

Verifica-se que a Ds e RP apresentam correlações positivas com a razão $Ct/(Ct + Gb)$, ou seja, a compactação do solo evidenciada pelos valores de densidade e resistência a penetração tende a ser maior, quanto maiores teores de Caulinita. Os valores de VTP apresentam-se de forma contrária, ou seja, altos valores da razão $Ct/(Ct + Gb)$ geram baixos valores de VTP.

Em relação à resposta da suscetibilidade magnética, observa-se correlação negativa entre SM e a relação $Ct/(Ct + Gb)$. Ao analisar o gráfico nota-se que áreas com maiores concentrações de minerais de maior expressão magnética tende a apresentar menor relação $Ct/(Ct + Gb)$, desta forma a tendência de compactação do solo é menor. HANESCH & SCHOLGER (2005) também encontraram correlações significativas da suscetibilidade magnética com atributos físicos e químicos de diferentes grupos de solos.

Esse trabalho aponta a importância do conhecimento da fração argila dos solos no sentido de enxergar áreas com maiores potenciais de compactação. Desta forma os resultados apresentam grande potencial de aplicação prática de valor incontestável, visto que evidenciam a possibilidade de predizer, de forma indireta, a concentração e distribuição dos minerais da fração argila que regem o comportamento físico dos solos tropicais. Segundo BRITO et al., 2006, áreas mais gibbsítica, proporcionam menores valores de densidade do solo e de resistência do solo à penetração do que a mineralogia mais caulínica das formas lineares. Assim identificando os locais com maiores concentrações de caulinita, por meio de técnicas indiretas como SM, torna-se possível mapear os locais mais propícios a compactar.

Esta informação prática torna-se importante no sentido de adequar o manejo da área e tempo de trabalho, como por exemplo, adoção de zonas específicas de manejo, mapas de trafegabilidade, tempo de retomada após precipitações entre outras. Reduzindo desta forma os danos devido à compactação e principalmente evitando compactar locais devido ao manejo equivocado da área. Os estudos de DALAL & HENRY (1986) e ressalta a importância do estudo da distribuição espacial da SM visto seu potencial de uso.

Comparando os resultados da FIGURA 2 com a localização dos solos na paisagem (FIGURA 1b), pode-se inferir que a paisagem também pode ser utilizada como ferramenta de campo na identificação de áreas com diferentes potenciais de compactação do solo, visto que a mesma influencia na espacialização dos minerais.

JONG et al. (2000) mencionam que a SM do solo varia com a posição do perfil do solo na paisagem. A adoção de ferramentas que auxiliem o manejo é fundamental para que problemas não sejam acrescidos devido a práticas realizadas sem o correto procedimento técnico.

3.4. CONCLUSÃO

A suscetibilidade magnética pode ser utilizada como indicador do potencial de compactação do solo e, por conseguinte, um pedoindicador que subsidia de forma indireta os diferentes comportamentos dos atributos mineralógicos que influenciam na qualidade física do solo.

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; SOUZA, T. T. T.; INDIA JUNIOR, A. V. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 105, p. 122-127, 2009.

ALVES, M. E. Tese. Atributos mineralógicos e eletroquímicos, adsorção e dessorção de sulfato em solos paulistas. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 196p. Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas. Piracicaba, São Paulo, 2002.

ASAE. American Society of Agricultural Engineers. ASAE S313.3 Soil Cone penetrometer. In: ASAE Standards 1999. St. Joseph, p.834-835, 1999.

AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 34, p. 609-617, 2004.

BORGGGAARD, O. K.; SZILAS, C.; GIMSING, A. L.; RASMUSSEN, L.H. Estimation of soil phosphate adsorption capacity by means of a pedotransfer function. *Geoderma*, Amsterdam, v. 118, n. 1-2, p. 55-61, 2004.

BRITO, L. F.; SOUZA, Z. M.; MONTANARI, R.; MARQUES JR., J.; CAZETTA, D. A.; CALZAVARA, S. A.; OLIVEIRA, L. Influência de formas do relevo em atributos físicos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.36, n.6, p.1749-1755, 2006.

CAMARGO, L. A. Mineralogia da argila por difração de raios x e espectroscopia de reflectância difusa em Latossolos sob diferentes superfícies geomórficas. 2013. 125

f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale, *Catena*, Amsterdam, v., 100, n. 1, p. 100-106, 2013.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo. II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 32, 2279-2288, 2008.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo. II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2279-2288, 2008b.

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

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

CAMPOS, R. C.; DEMATTÊ, J. A. M. Cor do solo: uma abordagem da forma convencional de obtenção em oposição à automatização do método para fins de classificação de solos. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.28, n°.5, 2004.

CRAIK, D. Magnetism, principles and applications. Lisboa. John Wiley and Sons, 1995, 459p.

CUNHA, P.; MARQUES JR, J.; CURI N.; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma seqüência Arenítico-Basáltica da região de Jaboticabal (SP). *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 29, n°.1, 2005.

DALAL, R. C.; HENRY, R. J. Simultaneous determination of moisture, organic carbon and total nitrogen by near infrared reflectance spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal* 50:120-123, 1986.

DEARING, J. A., LEES, J. A.; WHITE, C. Mineral magnetic properties of acid gleyed soils under oak and Corsican pine, *Geoderma*, n. 68, v. 68, p. 309–319. 1995.

DEARING, J. A., LIVINGSTONE, I. P., BATEMAN, M. D.; WHITE, K. 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*, v. 76–77, p. 43–56. 2001.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 212p., 1997.

EYRE, J. K.; SHAW, J. Magnetic enhancement of Chinese loess—the role of γ Fe_2O_3 , *Geophysical Journal International*. v. 117, p. 265–271. 1994.

FERREIRA, M. M., FERNANDES, B., CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região Sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 23 p.515-524, 1999a.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURN, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 23:507-514, 1999b.

FITZPATRICK, R. W. SCHWERTMANN, U. Al-Substituted goethite an indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. *Geoderma*, 27:335- 347, 1982.

FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M. & CAMPOS, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. *Geoderma*. Amsterdam, v.96, p.81-99, 2000.

FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Iron oxides in selected Brazilian oxisol: I. Mineralogy. *Science Society of America Journal*, v. 55, p. 1143-1149, 1991.

GHIDIN, A. A. et al. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná: I - Mineralogia da fração argila. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 30, n. 02, p. 293-306. 2006.

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

GHIDIN, A. A.; MELO, V. F.; LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. Toposseqüência de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. II – Relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 307-319, 2006b.

HANESCH, M., SCHOLGER, R.; DEKKERS, M. J. 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*, v. 26, p. 885–891. 2001.

HANESCH, M.; SCHOLGER, R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. *Geophys. J. Int.* 161, 50-56, 2005.

HUGHES, J. C. ; BROWN, G. A crystallinity index for soil kaolinite and its relation to parent rock, climate and soil maturity. *J. Soil Sci.*, 30:557-563, 1979.

INDA JÚNIOR, A. V.; KÄMPF, N. Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 29:851-866, 2005.

JONG, E.; PENNOCK, D. J.; NESTOR, P. A. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada, *Catena*, Amsterdam, v. 40, n. 3, p. 291-305, 2000.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.107-138, 2000.

KAMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Avaliação da estimativa de substituição de Fe por Al em hematitas de solos. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 22, p. 209-213, 1998.

KAMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequence in Southern Brazil and their application in classification of kaolinitic Soils. *Geoderma*, Amsterdam, v. 29, p. 27-39, 1982.

KEMPER, W. D. Aggregate stability of soils from wester United State and Canada. Washington: U.S. Govern. Print. Office, 1966. (Technical Bulletin, 1355).

KITAMURA, A. E.; CARVALHO, M. P.; LIMA, C. G. R. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 31, n. 2, p. 361-369, 2007.

KLUG, H. P.; ALEXANDER, L. E. X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials. New York: John Wiley & Sons, 716 p., 1954.

LUQUE, E. C. Propiedades magnéticas de los óxidos de hierro en suelos. 2008. 179 f. Tese (Ciências Químicas) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes, Universidad de Córdoba, Córdoba, 2008.

MAHER, B. A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications, palaeogeography. palaeoclimatology. palaeoecology. v. 137, n. 30, p. 25–54, 1998.

MAHER, B. A.; ALEKSEEV, A.; ALEKSEEVA, T. Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation, Palaeogeography. palaeoclimatology. Palaeoecology. v. 201, p. 321– 341, 2003.

MAHER, B.A.; THOMPSON, R. The magnetic record of palaeoclimate in the terrestrial loess and palaeosol sequences, in Quaternary Climates. In: Environments and Magnetism (eds MAHER, B.A. & THOMPSON, R.). University Press, Cambridge, p. 81–125, 1999.

McBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. Geoderma, Amsterdam, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003.

McINTYRE, D. S. The effect of free ferric oxide on the structure of some Terra Rossa and Rendzina soils. J. Soil Sci, Oxford, v. 7, p. 302-306, 1956.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clay by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. Clays and Clay Miner. New York, v. 7, p. 317-327, 1960.

MELO, V. F.; FONTES, M .P. F.; NOVAIS, R. F.; SINGH, B. SCHAEFER, C. E. G. R. Características dos óxidos de ferro e de alumínio de diferentes classes de solos. Rev. Bras. Ciênc. Solo, 25:19-32, 2001b.

MESTDAGH, M. M.; VIELVOYE, L.; HERBILLON, A. J. Iron in kaolinite: II. The relationship between kaolinite crystallinity and iron content. Clay Miner., 15:1-13, 1980.

MOTTA, P. E. F.; KÄMPF, N. Iron oxide properties as support to soil morphological features for prediction of moisture regimes in Oxisols of Central Brazil. Z. Pflanzenernähr Bodenk., 155:385-390, 1992.

MUGGLER, C. C.; CURTI, N.; SILVA, M. L. N.; LIMA, J. M. Características pedológicas de ambientes agrícolas nos Chapadões do Rio Corrente, sudoeste da Bahia. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 31, p. 221-232, 1996.

PEDROTTI, A.; FERREIRA, M. M.; CURTI, N.; SILVA, M. L. N.; LIMA, J. M.; CARVALHO, R. Relação entre atributos físicos , mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. Rev. Bras. Ciênc. Solo, 27:1-9, 2003.

PLANÇON, A.; ZACHARIE, C. An expert system for the structural characterization of kaolinites. Clay Miner.,25:249-261, 1990.

REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, Amsterdam, v. 110, p. 131-146, 2002.

RODRIGUES, T. E.; KLAMT, E. Mineralogia e gênese de uma seqüência de solos do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 2, n. 2, p. 132-139, 1978.

SCHACHTSCHABEL, P.; BLUME, H. P.; BRÜMMER, G.; HARTGE, K. H. SCHWERTMANN, U. *Lehrbuch der Bodenkunde (Scheffer/Schachtschabel)*. 14th ed, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, p. 494. 1998.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian (Oxisols): a review, *Clay Minerals*, Londres, v. 43, p. 1–18, 2008.

SCHULZE, D. G. The influence of aluminium on iron oxides VIII. Unit-cell dimension of Al-substituted goethites and estimation of Al from them. *Clays Clay Minerals*, New York, v. 32, p. 36-44, 1984.

SCHWERTMANN, U. Some properties of soil and synthetic iron oxides. In: Stucki, J. W., GOODMAN, B. A.; SCHWERTMANN, U. (Eds.) *Iron in soil and clay minerals*. Dordrecht, v. 217, p 203-244, 1988.

SCHWERTMANN, U.; CARLSON, L. Aluminium influence on iron oxides: XVII. Unit-cell parameters and aluminium substitution of natural goethites. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.58, p.256-61, 1994.

SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. *Soil Sci.*, Baltimore, v.139, n.4, p.344-50, 1985.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). *Minerals in soil environments*. 2.ed. Madison: SSSA, p.379-438, 1989 (Book Series 1).

SILVA NETO, L. F.; INDA JUNIOR, A. V.; BAYER, C.; DICK, D .P.; TONIN, A. T. Óxidos de ferro em Latossolos tropical e subtropical brasileiros em plantio direto. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 32, p. 1873-1881, 2008.

SILVA, M. L. N.; BLANCANEUX, P.; CURI, N.; LIMA, J. M.; MARQUES, J. J. G. S. M.; CARVALHO, A. M. Estabilidade e resistência de agregados de Latossolo Vermelho-Escuro cultivado com sucessão milho adubo verde. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 33, n. 1, p. 97-103, jan. 1998.

SINGER, M. J., FINE, P.; VEROSUB, K. L.; CHADWICK, O. A. Time dependence of magnetic susceptibility of soil chronosequences on the California coast, *Quaternary Research*, v. 37, p. 323–332. 1992.

SINGER, M. J.; VEROSUB, K. L.; FINE, P.; TENPAS, J. A. conceptual model for the enhancement of magnetic susceptibility in soils, *Quaternary International*, v. 34-36, p. 243–248. 1996.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; MATIAS, S. S. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. *Soil Use and Management*, Oxford, v.26, p.425-431, 2010.

SOARES, J. L. N.; ESPINDOLA, C. R; PEREIRA, W. L. M. Physical properties of soils under intensive agricultural management. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 62, p. 165-172, 2005.

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

STRAUSS, R.; BRÜMMER, G. W.; BARROW, N. J. Effects of crystallinity of goethite: II. Rates of sorption and desorption of phosphate. *Eur. J. Soil Sci.*, 48:101-114, 1997.

TORRENT, J.; BARRON, V. E.; LIU, Q.S. Magnetic susceptibility changes in relation to pedogenesis in a Xeralf chronosequence in northwestern Spain. *Geophysical Research Letters*, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, v. 61, p. 161-173, 2010.

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

VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; MOTTA, P. E. F. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da região Sudeste do Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 38, n. 1, p.133-141, 2003.

WHITE, K.; WALDEN, J. The rate of iron oxide enrichment in arid zone alluvial fan soils, Tunisian southern atlas, measured by mineral magnetic techniques, *Catena*, v. 30, 215- 227. 1997.