

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
COLÉGIO POLITECNICO DA UFSM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA DE
PRECISÃO**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO
À PENETRAÇÃO EM UM CAMPO DE FUTEBOL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Leonardo Toscani Acosta

Santa Maria, RS, Brasil

2014

VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM UM CAMPO DE FUTEBOL

Leonardo Toscani Acosta

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional do Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, Área de Concentração em Manejo de Sítio Específico de Solo e Planta, do colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Agricultura de Precisão**.

Orientador: Prof. Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Toscani Acosta, Leonardo
Variabilidade Espacial da Resistência do Solo à Penetração em Um Campo de Futebol / Leonardo Toscani Acosta.- 2014. 33 p.; 30 cm

Orientador: Vanderlei Rodrigues da Silva
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, RS, 2014

1. Resistência 2. Penetração 3. Variabilidade 4. Compactação 5. Espacial I.
Rodrigues da Silva, Vanderlei II. Título.

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo (a) autor (a).

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Leonardo Toscani Acosta. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor. E-mail: llbracosta@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Colégio Politécnico da UFSM
Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À
PENETRAÇÃO EM UM CAMPO DE FUTEBOL**

elaborada por
Leonardo Toscani Acosta

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Agricultura de Precisão

COMISSÃO EXAMINADORA:

Vanderlei Rodrigues da Silva, Dr.
(Presidente/ Orientador)

Rodrigo Ferreira da Silva, Dr. (UFSM)

Douglas Rodrigo Kaiser, Dr. (UFFS)

Santa Maria, 24 de janeiro de 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa especialmente à minha esposa Luiza e aos meus filhos, Larissa e Pedro, pessoas pelas quais tenho grande amor, admiração e que sempre me apoiaram, em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Colégio Politécnico da UFSM, ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão e aos Professores pelos ensinamentos compartilhados e dedicação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva, que apesar da distância sempre procurou estar presente me ajudando e apoiando quando preciso, entendendo as dificuldades e contribuindo para a conclusão deste trabalho.

Aos Professores: Rodrigo Ferreira da Silva e Douglas Rodrigo Kaiser por gentilmente aceitarem o convite em fazer parte da Comissão Examinadora deste trabalho.

Aos Professores: Elódio Sebem e Telmo Jorge Carneiro Amado por toda dedicação e apoio durante esta etapa em minha vida.

Agradeço ao meu sogro, Antônio Luiz Braga e à minha sogra, Simone Gonçalves Cardoso, que sempre me ajudaram de todas as formas possíveis para que este sonho tornasse realidade.

À minha mãe, Janete Toscani Acosta e ao meu avô, Pedro Primo Toscani, que sempre me incentivaram e me apoiaram, dando-me força para vencer na vida.

À minha esposa, Luiza Braga Acosta, que me apoiou durante todo o curso, principalmente no momento de cuidar dos nossos filhos e compreender a minha ausência, que foi exigida durante a realização do mestrado.

À empresa, Drakkar Serviços Agrícolas Ltda, e aos colegas de trabalho, Alan Acosta e Claudio Lemainski, que custearam todas as minhas despesas durante o curso, tornando este momento possível.

À Deus-Pai, todo poderoso, que com o amor de Cristo, me deu saúde, paz e tranquilidade para vencer mais esta etapa da vida.

À todos os citados, o meu muito obrigado!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão
Universidade Federal de Santa Maria

VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM UM CAMPO DE FUTEBOL

AUTOR: LEONARDO TOSCANI ACOSTA

ORIENTADOR: VANDERLEI RODRIGUES DA SILVA

Data e local da defesa: Santa Maria, 24 de janeiro de 2014.

A resistência do solo a penetração pode ser utilizada como indicador da compactação do solo e até mesmo indicar a suscetibilidade de um solo a erosão. Considerando a influência da compactação do solo sobre o desenvolvimento do gramado, este trabalho tem como objetivo identificar a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, no campo de futebol do Clube União Frederiquense, em Frederico Westphalen, RS. O estudo foi realizado em um solo construído a partir de um Cambissolo Háplico, através de cem pontos amostrais, com três repetições, num espaçamento de 7m x 10m. A determinação da resistência do solo à penetração foi realizada com um penetrômetro de esforço manual, até a profundidade de 30 cm. Os dados foram analisados utilizando técnicas de estatística descritiva e geoestatística. Verificou-se que a resistência à penetração apresenta variabilidade espacial moderada, e os níveis de compactação foram diferentes entre as profundidades analisadas, evidenciando um aumento da resistência a penetração ao longo do perfil do solo. Mapas de isolinhas foram criados, usando-se métodos matemáticos baseados no inverso do quadrado da distância, empregando o programa FalkerMap®, para melhor visualização da espacialização dos dados.

Palavras-chave: Resistência, Compactação, Variabilidade, Geoestatística.

ABSTRACT

Master Dissertation
Master Course in Precision Agriculture
Federal University of Santa Maria

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL PENETRATION RESISTANCE ON A FOOTBALL FIELD

AUTHOR: LEONARDO TOSCANI ACOSTA
ADVISOR: VANDERLEI RODRIGUES DA SILVA
Santa Maria, January 24, 2014.

The resistance to the soil's penetration can be used as an indicator of its compaction as well as indicate for its susceptibility to erosion. Considering the influence of the soil compaction on the development of grass, the aim of this study was to identify the spatial variability of the soil resistance to penetration on the football field of the União Frederiquense Club, in Frederico Westphalen, RS, Brazil. The study was performed in a soil constructed from a Haplic Cambisol. Soil penetration resistance was measured by using a penetrometer of manual effort to a depth of 30 cm, using one hundred sampling points, with three replicates, in spacing of 7m x 10m. The obtained data were analyzed by using a descriptive statistics and geostatistics. It was verified that the resistance to penetration presented moderate spatial variability and the compaction levels were different between the examined depths, demonstrating an increase in the resistance of penetration throughout the soil profile. Isoline maps were created by using mathematical methods based on the inverse square of the distance, employing FalkerMap ® program, for better visualization of spatialization of data.

Keywords: Resistance, Compression, Variability, Geostatistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização dos pontos amostrados no campo de futebol do Clube União Frederiquense, Frederico Westphalen, RS.	18
Figura 2 - Representação de um Semivariograma, indicando efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C) e alcance (a). Adaptado de Guimarães (2004).....	20
Figura 3 - Semivariogramas da variável resistência do solo à penetração nas profundidades de 5, 7, 10, 12, 15, 20 e 30 cm. C_0 = efeito pepita.	24
Figura 4 - Resistência do solo à penetração nas extremidades do campo em MPa.	26
Figura 5 - Resistência do solo à penetração no centro do gramado em MPa.	27
Figura 6 - Mapas de isolinhas dos dados de resistência do solo a penetração em Megapascal (MPa).	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de média (em MPa), mediana (Med), mínimo (Mín em MPa), máximo (Máx em MPa), coeficiente de variação (CV em %), assimetria (Ass), curtose (Curt) e teste de Shapiro Wilk (W) para resistência à penetração, em diferentes profundidades (Profund em cm).	21
Tabela 2 - Estimativa dos dados de efeito pepita (Co), patamar (Co+C1), alcance (A), relação efeito pepita/patamar ($1-(Co/Co+C1)$) e modelo ajustado aos semivariogramas, para resistência à penetração (MPa), em diferentes profundidades (Profund em cm).....	22

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3 MATERIAL E MÉTODOS	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
5 CONCLUSÕES	29
REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

O lazer de grande parte das pessoas está intrinsecamente ligado à prática de esportes. O futebol, por exemplo, é um dos esportes mais populares do mundo, praticado, segundo o boletim da Federação Internacional das Associações de Futebol (FIFA), por mais de 60 milhões de pessoas em mais de 150 países. Os brasileiros, em especial, têm cultuado o futebol como uma das principais práticas de lazer. Porém, para que as atividades esportivas ocorram, há necessidade de se trabalhar a infraestrutura a ser oferecida aos praticantes.

A construção e gerenciamento de campos de futebol devem prover estabilidade e durabilidade adequada às superfícies gramadas, além de minimizar a ocorrência de danos físicos aos jogadores. A qualidade da superfície gramada de áreas desportivas, como campos de futebol, é fundamental para que os jogos ocorram normalmente. O problema é que, mesmo com um excelente gramado, a superfície de um campo de futebol sofre o pisoteio dos jogadores, e as partículas do solo sob a grama sofrem um processo de compressão, preenchendo os vazios existentes em sua estrutura desencadeando a compactação e aumentando a resistência do solo à penetração (SANTOS, 2008).

Os solos sob os gramados de futebol devem apresentar um coeficiente de permeabilidade superior à intensidade da precipitação pluviométrica da região do campo, pois a sua estrutura tem uma participação muito importante no processo de drenagem, porque além de permitir o desenvolvimento adequado da vegetação, deve possibilitar a infiltração da água que poderia se acumular na superfície. Se o coeficiente de permeabilidade for inferior à intensidade da precipitação pluviométrica, poderá haver a formação de poças de água (CARRIBEIRO, 2010).

Os Cambissolos são solos em transformação, variando de fortemente, até imperfeitamente drenados, rasos a profundos, de cor bruno-amarelada, de alta a baixa saturação por bases e atividade química da fração coloidal. O horizonte B incipiente (Bi), característico destes solos, tem textura franco-arenosa a mais argilosa e geralmente, apresenta teores uniformes de argila, podendo ocorrer um pequeno decréscimo ou incremento do horizonte A para o Bi. Os Cambissolos mais rasos apresentam fortes limitações para o uso e à alta suscetibilidade aos processos de erosão e compactação (EMBRAPA, 2006).

A compactação consiste na aproximação das partículas do solo, com redução no volume por elas ocupado. Este processo resulta de tensões aplicadas sobre o solo, trazendo aumento na densidade e redução do espaço poroso, redução da infiltração e do movimento interno de água, e maior resistência mecânica do solo ao crescimento das raízes (REICHERT et al., 2010). Desse modo, a compactação altera a fluxo hídrico do solo e, repercute diretamente no crescimento da vegetação.

Um dos indicadores de compactação no solo é a resistência do solo à penetração, que descreve a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, como uma raiz em crescimento ou uma ferramenta de cultivo. A compactação afeta a qualidade do solo e a sua avaliação é baseada na condição atual em que se encontra o solo em comparação a uma condição natural ou sem restrições ao crescimento e produtividade das plantas (SILVA et al., 2004).

Para Bertollo et al. (2013) torna-se relevante estudar os indicadores de qualidade física dos solos, a resistência do solo à penetração deve ser avaliada em diferentes teores de umidade.

A preferência em utilizar penetrômetros pelos pesquisadores para medir o estado de compactação está na praticidade e rapidez na obtenção dos resultados. Ainda, os penetrômetros medem a resistência do solo em pequenos incrementos de profundidade, sendo úteis para avaliar camadas de maior resistência em profundidade e os valores de resistência à penetração são positivamente correlacionados com a densidade e textura do solo (SILVA et al., 2004).

As propriedades físicas do solo estudadas por diversos autores variaram de um local para outro, apresentando continuidade ou dependência espacial, dependendo do manejo adotado e das próprias características de origem dos solos. Para Beutler et al. (2002) a resistência do solo a penetração, depende entre outros fatores, do tipo de solo, histórico de uso e preparo do solo. Solos submetidos a diferentes sistemas de manejo são alterados em profundidade e, o conhecimento deste fator é fundamental no estudo da dependência espacial.

O desenvolvimento das plantas em determinada área é caracterizado por regiões altamente desenvolvidas e outras com baixo crescimento, condição que pode ser correlacionada com a variabilidade espacial das características físicas do solo (MOLIN, 2002). O estudo da correlação da variabilidade do solo versus crescimento das plantas serve como ferramenta extremamente útil na tomada de

decisões das práticas de manejo, resultando em medidas que potencializam uma exploração mais sustentável e eficiente (FREDDI et al., 2006).

Em grau elevado de compactação, métodos mecânicos como escarificação ou subsolagem são necessários para a correção de algumas propriedades físicas do solo. Vieira et al. (2010) não observaram diferenças na densidade do solo, porém a taxa de infiltração de água foi maior no solo que recebeu a escarificação.

A semeadura de plantas de cobertura do solo com sistema radicular abundante e vigoroso pode ser uma alternativa aos métodos mecânicos com benefícios adicionais pela reciclagem de nutrientes no perfil, aportarem matéria orgânica e melhorarem a estabilidade dos agregados, conferindo ao solo maior porosidade e resistência mecânica (Villamil et al., 2006). Em Latossolo Vermelho cultivado por cinco anos com plantas de cobertura, Argenton et al. (2005) relataram que a mucuna cinza melhorou a qualidade física, observada pelo aumento da macroporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica.

A distribuição da resistência do solo à penetração é um indicativo do nível de compactação do solo. Em um campo de futebol, a pressão exercida pelos atletas está concentrada na parte central do campo e nas proximidades das goleiras. Conhecer o problema, podendo caracterizá-lo em intensidade, localização e profundidade são fundamentais para saber as causas, resolvê-las e evitar que volte a ocorrer.

A hipótese que fundamenta este trabalho é de que o pisoteio dos jogadores durante os jogos de futebol ocasione uma compressão do solo abaixo do gramado, interferindo na variabilidade espacial da resistência do solo a penetração. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial da resistência do solo a penetração, até uma profundidade de 30 cm, como indício de compactação, no campo de futebol do Clube União Frederiquense, de Frederico Westphalen, RS.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Barros Júnior (2011) explica que a qualidade do solo para as plantas deve-se primeiramente a profundidade efetivamente disponível ao desenvolvimento radicular, o qual se refere à profundidade máxima que as raízes penetram livremente no perfil do solo e em número razoável, sem impedimento, proporcionando às plantas suporte físico e condições de absorção de água e nutrientes. Muitas características do perfil do solo como o contato lítico, presenças de saprólitos, horizontes petroplínticos, petrocálcicos, dentre outros, podem interferir no aprofundamento e desenvolvimento radicular dos vegetais.

Os Cambissolos são solos que apresentam horizonte subsuperficial submetido a pouca alteração física e química, porém, suficiente para desenvolvimento de cor e estrutura. Em geral, apresentam minerais primários facilmente intemperizáveis, teores mais elevados de silte, indicando baixo grau de intemperização. O horizonte subsuperficial é denominado B incipiente (Bi). São solos de coloração bruno amarelada no horizonte superficial e vermelho amarelada no Bi. A estrutura é bastante variável, predominando blocos subangulares e até mesmo em alguns perfis, observa-se a presença de cascalhos. Apresentam textura variada, desde muito argilosa até franco arenosa, com cascalho ou sem cascalho. Quanto ao potencial de uso, deveriam ser destinados à preservação permanente, pois se encontram em relevos íngremes ou rasos (EMBRAPA, 2004).

Marasca et al. (2011) afirmam que um fator prejudicial e limitante ao desenvolvimento das plantas é a compactação do solo, parâmetro que pode ser quantificado pela resistência do solo à penetração e altamente influenciado pelo teor de água. Esta variável apresenta variabilidade espacial e temporal, características que podem ser determinadas pela técnica da geoestatística. Este conceito, além de considerar o valor de cada ponto amostral, também associa a posição geográfica em que se encontra, possibilitando que amostras próximas tenham valores mais semelhantes e sejam mais correlacionadas do que amostras mais distantes do ponto de referência (SILVA et al., 2003).

Modolo et al. (2008) caracterizam a compactação do solo como uma alteração estrutural que promove reorganização das partículas e de seus agregados podendo limitar a adsorção, as trocas gasosas, absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, atraso na emergência das plântulas e comprometimento do

desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea, resultando em decréscimos no crescimento das culturas.

Silva et al. (2003) também relataram que o atributo físico adotado como indicativo da compactação tem sido a resistência do solo à penetração, por apresentar relações diretas com o desenvolvimento das plantas e por ser mais eficiente na identificação de estados de compactação comparada à densidade do solo. O valor da resistência do solo a penetração normalmente utilizado como limitante é de 2,0 MPa (LIMA et al., 2012).

Recentemente, alguns trabalhos de pesquisa têm apontado a possibilidade de aumentar os valores limitantes de resistência à penetração do solo para 3,5 MPa (BETIOLI JUNIOR et al., 2012). Para Souza et al. (2006), os valores de resistência a penetração considerados limitantes para o crescimento radicular das plantas variam de 1,5 a 3,0 MPa. Porém, Tavares Filho et al. (2001) concluíram que valores de resistência do solo à penetração de 1 a 3,5 MPa, não restringem o desenvolvimento radicular do milho apenas influenciaram na morfologia das raízes.

Torres & Saraiva (1999) descreveram que valores em torno de 2,5 MPa são considerados baixos, ao passo que valores em torno de 3,5 a 6,5 MPa, aparentemente, são considerados como valores capazes de causar problemas de impedimento mecânico para o desenvolvimento radicular das plantas. Mercante et al. (2003) consideraram as resistências em torno de 3,5 MPa, como indicativo de baixa compactação, e de 6,5 MPa, de alta compactação.

Em estudo realizado por Sampietro et al. (2011) sobre a compactação de Cambissolos, foi concluído que a camada superficial do solo apresentou maior susceptibilidade às alterações na densidade do solo e resistência mecânica à penetração promovida pelas forças exercidas na superfície. De acordo com Embrapa (2006), a ocorrência de horizontes subsuperficiais com alta densidade e resistência mecânica, aparentemente cimentada quando seco, mas com moderada a fraca resistência a quebra em profundidades menores que 0,5 m pode limitar o crescimento radicular.

Tavares Filho et al. (2001) relataram em trabalho realizado sobre a resistência do solo a penetração, que um diagnóstico qualitativo (distribuição espacial das estruturas no perfil do solo) e quantitativo (grau da compactação do solo) são fundamentais, não só para auxiliar a verificação da qualidade do manejo utilizado,

mas também para auxiliar o estabelecimento de limites de compactação que não afetem o desenvolvimento radicular das plantas nos diferentes sistemas de manejo.

Cambardella et al. (1994) afirmaram que as variáveis físicas do solo que apresentam forte dependência espacial são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo, oriundas da pedogênese, do que a fatores ambientais.

Venn e Boone (1990) concluíram que a resistência real exercida pelo solo à penetração radicular é normalmente menor do que a resistência determinada pelo penetrômetro. Portanto, fica claro que, mesmo sendo detectados valores de resistência de solo à penetração acima dos relatados pela literatura como restritivos ao desenvolvimento radicular, se existirem estruturas que permitam a circulação de oxigênio, condições químicas e de umidade do solo ideais, as raízes irão procurar pontos de menor resistência para seu crescimento, embora sofram deformações morfológicas.

Além disso, a compactação do solo pode impedir o influxo de nutrientes devido à deformação das raízes. Medeiros et al. (2005) afirmam que a compactação do solo reduz a absorção de N, P, K, a produção de massa seca das raízes, o número de perfilhos e a produção de massa seca da parte aérea das plantas de arroz. Assim, a avaliação e o monitoramento das camadas de impedimento mecânico do solo ao desenvolvimento radicular, tornam-se ferramentas importantes para caracterizar o crescimento das plantas e, também, para servir como subsídio indispensável a ser usado no planejamento e direcionamento das práticas de cultivo empregadas dentro de cada realidade (EMBRAPA, 1999).

A caracterização da camada compactada e do comportamento do solo em relação às suas propriedades físicas, como densidade, porosidade, umidade e capacidade de retenção e infiltração da água e, principalmente, a localização da camada compactada, é de extrema importância para o planejamento das técnicas de manejo dos diferentes tipos de solos. Então, Laia et al. (2006), consideram que o desenvolvimento de equipamentos que meçam com precisão a resistência do solo a penetração (penetrômetros) e de técnicas que reproduzam mapas de resistência do solo, são de elevada significância para as operações de preparo e uso dos solos.

Penetrômetros ou penetrógrafos são instrumentos que medem a resistência à penetração em unidades de pressão (força/área) de um cone padrão, posicionado na extremidade de uma haste de metal, quando inseridos no interior do solo. Essa resistência à penetração está relacionada à resistência exercida pelo solo à

penetração e crescimento das raízes e, portanto, pode ser utilizada como uma medida da compactação dos solos (EMBRAPA, 2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no ano de 2013, no campo de futebol do Clube União Frederiquense, em Frederico Westphalen, RS, localizado geograficamente a 27°21'42" S e 53°24'24" O. A área em estudo apresenta 7000 m², o solo sob o gramado foi construído a partir de um Cambissolo Háplico (EMBRAPA, 1999), com relevo basicamente plano, o clima característico do local é o subtropical úmido, tipo Cfa, de acordo com a determinação de Köppen (MORENO, 1961).

Inicialmente a área foi dividida em malha amostral de 07 x 10 m, de forma manual, com o auxílio de trenas métricas. Com esta malha, foram gerados 100 pontos amostrais (Figura 1).



Figura 1 – Localização dos pontos amostrados no campo de futebol do Clube União Frederiquense, Frederico Westphalen, RS.

As medições de resistência a penetração foram realizadas com o equipamento PenetroLOG® (Medidor Eletrônico de Compactação do Solo) e o solo encontrava-se em capacidade de campo. Foram realizadas três repetições por ponto amostral de forma aleatória para compor a média de cada ponto em uma profundidade de até 30 cm.

Após coletados, os dados foram transferidos para o computador e tabelados em planilhas eletrônicas. A espacialização da variabilidade da resistência do solo à penetração foi procedida por meio da elaboração dos mapas de isolinhas, utilizando o *software* FalkerMap® e medidos em Megapascal (MPa). Optou-se, baseado na literatura agrícola, pelo levantamento pontual da resistência do solo a penetração nas profundidades: 5 cm, 7 cm, 10 cm, 12 cm, 15 cm, 20 cm e 30 cm. Para isso, foram considerados os valores médios encontrados ao longo dessas profundidades. Valores discrepantes foram considerados como erros e descartados. Os mapas foram gerados utilizando-se modelos matemáticos baseados no interpolador inverso do quadrado da distância, auxiliado pelo programa FalkerMap®.

Os valores de resistência do solo a penetração foram analisados por estatísticas descritivas, tais como: média aritmética, mediana, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria, coeficiente de determinação e de curtose, bem como o teste W (Shapiro-Wilk) (SNEDECOR; COCHRAN, 1974).

A dependência espacial dos atributos estudados foi avaliada pelo cálculo da semivariância e do ajuste dos dados ao semivariograma. Os semivariogramas são representações gráficas entre a semivariância $\gamma(h)$ representada na coordenada y, em função de uma determinada distância h, representada na coordenada x. Quanto mais próximos estiverem os pontos amostrados, maior será a semelhança entre eles e, portanto, menor será a semivariância. À medida que aumentamos a distância (h) entre os pontos amostrados, aumenta-se a semivariância, até atingir um valor constante. A distância (h) onde a semivariância é considerada constante, é chamada de alcance da dependência espacial (a). Na prática, determinações realizadas a distâncias maiores que "a", tem distribuição espacial aleatória e, portanto, são dependentes entre si (GUIMARÃES, 2004). O valor onde a semivariância é considerada constante é chamada de patamar (C_0+C). O efeito pepita (C_0) é a ausência de dependência espacial.

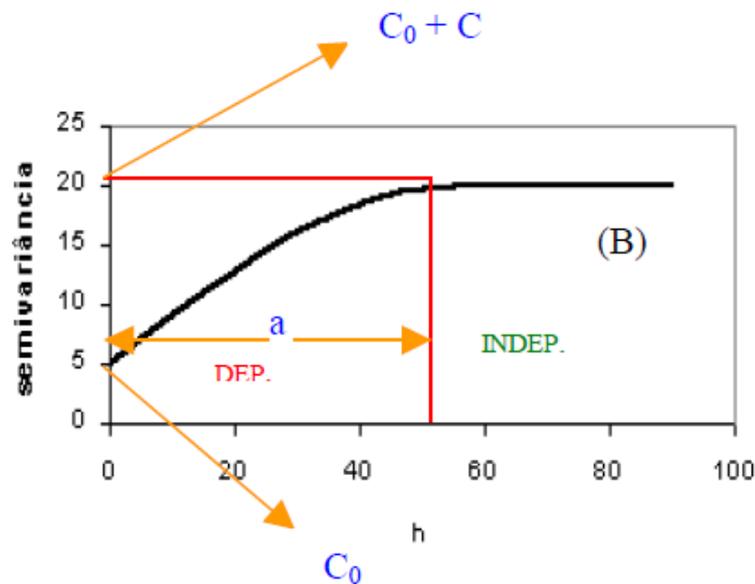


Figura 2 - Representação de um Semivariograma, indicando efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C) e alcance (a). Adaptado de Guimarães (2004).

O ajuste de semivariogramas foi realizado pelo software GS+ (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 1998), testando semivariogramas do tipo esférico, exponencial e linear. A escolha do modelo foi realizada observando-se o maior coeficiente de determinação (R^2) e o melhor coeficiente de correlação obtido pela técnica chamada de validação cruzada. Essa técnica consiste em retirar, individualmente, cada ponto medido da área estudada e o seu valor é estimado pelo modelo como se ele nunca existisse. Após escolher o semivariograma esférico como o de melhor ajuste à variável, realizou-se a krigagem dos dados.

A krigagem estima valores entre os pontos observados considerando os parâmetros do semivariograma, sendo muito útil para confeccionar mapas de superfície com maior precisão. Para analisar o grau de dependência espacial foi realizado uma modificação da classificação de Cambardella e colaboradores (1994), subtraindo uma unidade do resultado da divisão entre C_0 e $(C_0 + C_1)$.

A razão entre o efeito pepita e o patamar $C_0/(C_0+C_1)$ permite a classificação do grau de dependência, e por consequência, permite inferir comparativamente sobre a dependência entre as resistências à penetração do solo. Nesse caso, são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm um efeito pepita $> 75\%$ do patamar, de dependência espacial moderada quando o efeito pepita está entre 75% e 25% do patamar e de fraca dependência espacial quando o efeito pepita é $< 25\%$ do patamar (CAMBARDELLA et al., 1994).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No campo de futebol estudado, a resistência do solo à penetração, na profundidade de 15 cm, não apresentou distribuição normal dos dados (Tabela 1). Nas demais profundidades, a resistência à penetração apresentou distribuição normal, conforme o teste W (Shapiro-Wilk). Estes resultados discordam com dos encontrados por Silva et al. (2004), em Latossolo Vermelho Distrófico e Latossolo Vermelho distroférico e, concordam com os obtidos em Argissolo Vermelho Amarelo distrófico que não apresentaram distribuição normal na profundidade de 15 cm.

Silveira et al. (2010), estudando um Argissolo Amarelo distrocoeso, concluíram que a resistência do solo à penetração apresentou distribuição diferente da normal em todas as profundidades trabalhadas. Este resultado é semelhante ao encontrado por Abreu (2000), que ao trabalhar com um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico arênico, verificou distribuição normal para a resistência a penetração nas profundidades de 5 cm, 7,5 cm, 10 cm e 15 cm e distribuição não normal para as profundidades de 2,5 cm, 12,5 cm, 17 cm e 30 cm.

Tabela 1 - Valores de média (em MPa), mediana (Med.), mínimo (Mín. em MPa), máximo (Max em MPa), coeficiente de variação (CV em %), assimetria (Ass), curtose (Curt) e teste de Shapiro Wilk (W) para resistência à penetração, em diferentes profundidades (Profund em cm).

Profund	Média	Med.	Mín	Máx	CV	Ass	Curt	(W)
05	2,56	2,52	0,18	5,82	35,84	0,49	1,78	0,971*
07	3,13	3,00	0,06	6,79	33,98	0,70	2,08	0,954*
10	4,07	3,96	2,10	7,09	27,34	0,68	0,06	0,960*
12	4,65	4,36	1,96	9,49	30,16	1,01	1,25	0,937*
15	5,05	4,97	2,38	8,16	24,55	0,32	-0,29	0,982 ^{ns}
20	5,16	5,09	2,71	11,57	26,65	1,27	3,93	0,926*
30	5,53	5,00	2,73	12,24	36,38	1,33	1,75	0,889*

ns = não significativos em 5 % de probabilidade. * significativo, apresentando distribuição normal.

Nas profundidades estudadas, a resistência do solo à penetração apresentou coeficiente de variação (CV) de 24,55% a 36,38%, classificando-se como médio, de acordo com a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), que classificam o coeficiente de variação como baixo (< 12 %), médio (12 a 60 %) e alto (> 60 %).

Estes resultados discordam dos obtidos por Souza et al. (2001), ao estudar a variabilidade espacial dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. Os valores médios da resistência do solo à penetração nas profundidades de 05, 07, 10, 12, 15, 20 e 30 cm foram 2,56, 3,13, 4,07, 4,65, 5,05, 5,16 e 5,53 MPa, respectivamente (Tabela 1). Constata-se um aumento da resistência do solo à penetração à medida que aumenta-se a profundidade do solo.

Conforme Souza et al. (2006), esta variação nos valores da RP, de 2,56 a 5,53 MPa, é considerada crítica para o crescimento radicular das plantas. No estudo realizado por Tavares Filho et al. (2001), os valores de resistência do solo à penetração de 1 a 3,5 MPa não restringiram o desenvolvimento radicular do milho, mas apenas influenciaram na morfologia das raízes. Mercante et al. (2003), consideraram as resistências em torno de 3,5 MPa como indicativo de baixa compactação, e de 6,5 MPa, como de alta compactação.

Com o ajuste ao modelo esférico, a avaliação da resistência do solo à penetração apresentou dependência espacial moderada (75% a 25% do patamar) em todas as profundidades estudadas (Tabela 2), conforme classificação adaptada de Cambardella et al., 1994. Ao estudar a variabilidade espacial dos atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico, sob semeadura direta, Souza et al. (2001) também encontraram valores de dependência espacial moderada para as características físicas analisadas. Dessa forma, acredita-se que a resistência do solo à penetração, na maioria das vezes, sofre moderada influência dos processos da pedogênese do solo (CAMBARDELLA et al., 1994).

Tabela 2 - Estimativa dos dados de efeito pepita (Co), patamar (Co+C1), alcance (A), relação efeito pepita/patamar ($1-(Co/Co+C1)$) e modelo ajustado aos semivariogramas, para resistência à penetração (MPa), em diferentes profundidades (Profund em cm).

Profund	(Co)	(Co+C1)	(A) ¹	$(1-(Co/Co+C1))$	r ²	VC ²	Modelo
05	0,49	0,99	7,91	0,505	0,77	0,720	Esférico
07	0,73	1,89	17,61	0,614	0,80	0,605	Esférico
10	0,95	1,90	21,09	0,500	0,22	-1,399	Esférico
12	1,50	3,00	21,09	0,500	0,77	0,236	Esférico
15	1,17	2,35	21,09	0,502	0,57	-0,550	Esférico
20	1,44	2,89	21,09	0,502	0,30	0,212	Esférico
30	2,93	6,95	21,09	0,578	0,70	0,815	Esférico

1- Alcance em metros. 2- Validação Cruzada.

O alcance (A) é um parâmetro importante na análise geoestatística, pois expressa a dependência espacial ou distância em que uma variável pode apresentar o mesmo efeito (OLIVEIRA et al., 2013), sendo que os pontos coletados com distâncias maiores que o alcance são independentes e sua análise é realizada pela estatística clássica (VIEIRA, 2000).

A resistência do solo à penetração, nas profundidades estudadas (Tabela 2), apresentou em todos os casos alcance superior ao estabelecido na malha amostral, variando de 7,91 a 21,09 m, indicando, de forma geral, maior continuidade na distribuição espacial da compactação.

Na profundidade de 5 cm o alcance foi bem menor (7,91 m) quando comparado com as demais profundidades, ocorrendo aumento do alcance em profundidade para a variável em estudo, indicando a maior descontinuidade na distribuição espacial da resistência do solo à penetração na camada mais superficial, concordando com estudo de Souza et al. (2001).

Silva et al. (2004) observaram um comportamento semelhante ao estudar a variabilidade espacial da resistência do solo a penetração em plantio direto, concluindo que na profundidade de 5 cm, o alcance da dependência espacial foi de, aproximadamente, 13 metros e nas profundidades de 7,5 e 10 cm, os valores de alcance ficaram em torno de 17 metros.

O efeito pepita é um parâmetro importante do semivariograma e indica uma variabilidade não explicada, considerando a distância de amostragem utilizada. Esse parâmetro pode ser expresso como percentagem do patamar, e tem por objetivo facilitar a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo (CAMBARDELLA et al., 1994).

A resistência do solo à penetração no campo de futebol apresentou dependência espacial moderada em todas as profundidades estudadas, expressando-se por meio dos modelos de semivariogramas (efeito pepita) e ajustando-se ao modelo esférico (Figura 3).

Mercante et al. (2003), ao analisarem a variável resistência mecânica do solo à penetração em diferentes manejos, constataram uma dependência espacial moderada em todas as camadas avaliadas, uma vez que, todos os valores do coeficiente de efeito pepita ficaram dentro dos limites de 25 a 75 % do patamar.

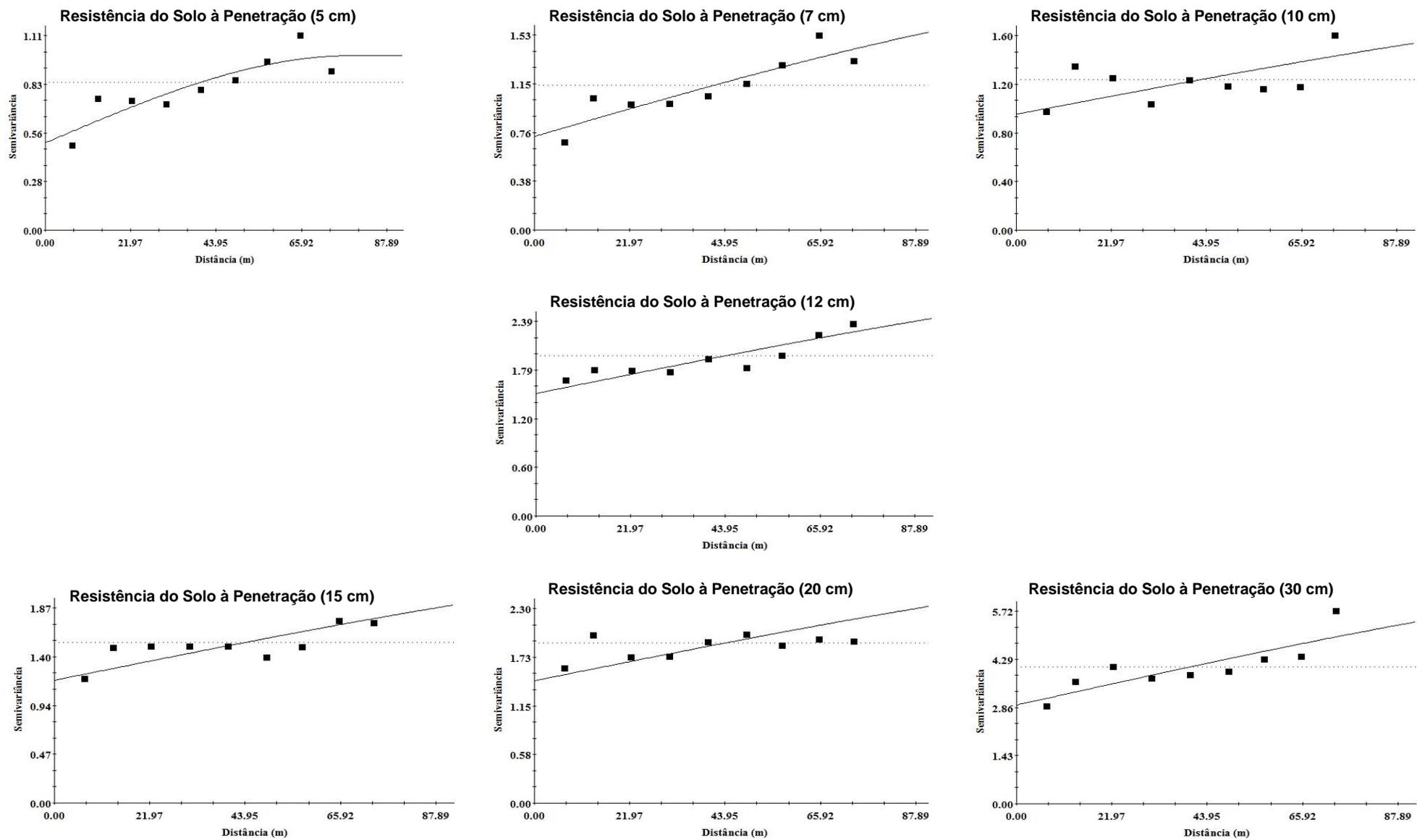


Figura 3 - Semivariogramas da variável resistência do solo à penetração nas profundidades de 5, 7, 10, 12, 15, 20 e 30 cm. Co = efeito pepita.

Andrade et al. 2005 ,trabalhando com a densidade do solo, observaram que os efeitos pepita ficaram de 81 a 97 % do patamar nas profundidades determinadas, concluindo-se que nessa área ocorre forte variabilidade espacial a distâncias menores que cinquenta metros.

Na Figura 4, estão representadas as isolinhas da resistência do solo à penetração nas profundidades de 5, 7, 10, 12, 15, 20 e 30 cm. Verifica-se a disposição da resistência a penetração, onde as pequenas áreas com ocorrência de concentrações de linhas de contorno fechadas indicam a ocorrência de variações nos valores da resistência do solo à penetração, isto é, flutuações nos valores em intervalo de espaço amostral pequenos. Na superfície (5 cm), não há áreas com maior estado de compactação que poderiam estar influenciando o crescimento do gramado. O impacto dos atletas no solo não foi suficiente para alterar a distribuição dos valores de resistência a penetração, provocando zonas com maiores níveis de compactação nas extremidades e na parte central do campo.

Na compactação ocorre uma reorganização das partículas que compõem a estrutura do solo, reduzindo a quantidade de ar nas proximidades da zona radicular, reduzindo a infiltração de água no solo e dificultando o crescimento radicular. Posteriormente a compactação verifica-se um decréscimo no desenvolvimento e crescimento radicular da grama, a expressão dessa condição é verificada com a formação de raízes finas e superficiais (CARRIBEIRO, 2010).

O potencial produtivo dos gramados de futebol é determinado principalmente por fatores como o clima, o solo e a espécie cultivada. Limitações ao desenvolvimento das gramas podem estar diretamente relacionadas ao fator solo. Carrow (1980), avaliando as respostas morfológicas, fisiológicas e a tolerância de três espécies de gramas de clima frio a solos submetidos a tratamento de compactação com rolo compactador, pode observar essa redução na qualidade da grama para todos os parâmetros avaliados independentemente da espécie. Os resultados obtidos pelo referido autor, comprovaram que o aumento da densidade do solo, interfere diretamente sobre o crescimento das plantas e que o crescimento torna-se limitado principalmente pela alteração nos espaços porosos do solo.

A resistência do solo à penetração cria, portanto, um ambiente bastante desfavorável para o crescimento das plantas. O pisoteio frequente causa danos significativos para as gramas no que diz respeito ao desgaste ou rompimento do sistema radicular dentro do solo indicando aumento de danos na parte aérea dos

gramados (ALI HARIVANDI, 2002). As principais consequências dos danos causados em gramas devido à compactação do solo são: a redução na absorção de água e nutrientes pelas raízes, menor formação de perfilhos, rizomas, estolões e redução no desenvolvimento da parte aérea.

O declínio no desenvolvimento da parte aérea das plantas favorece o aumento na absorção de radiação solar pelo solo e elevação de sua temperatura, além de permitir a invasão de plantas daninhas, contribuindo para a deterioração do gramado (CARROW, 1981). Ali Havirandi (2002) ainda afirma que há desenvolvimento de raízes rasas (superficiais) e grossas, e que ocorre perda da cor verde da grama (amarelamento geral) devido à menor disponibilidade de nitrogênio.

Nota-se uma maior compactação nas profundidades de 20 e 30 cm, nos mapas de isolinhas, em direção à coordenada X (10, 20, 90 e 100 m) nas extremidades do campo (Figura 4). Na parte central do gramado em direção a coordenada X (30, 40, 50, 60, 70 e 80 m) observa-se uma menor compactação, principalmente, nas profundidades de 5 e 7 cm (Figura 5). Na maior parte da área, a resistência do solo à penetração encontra-se entre 3,0 e 6,0 MPa nas profundidades de 10, 12, 15, 20 e 30 cm e uma pequena parte está na faixa de 1,0 a 3,0 MPa nas profundidades de 5 e 7 cm (Figura 6).

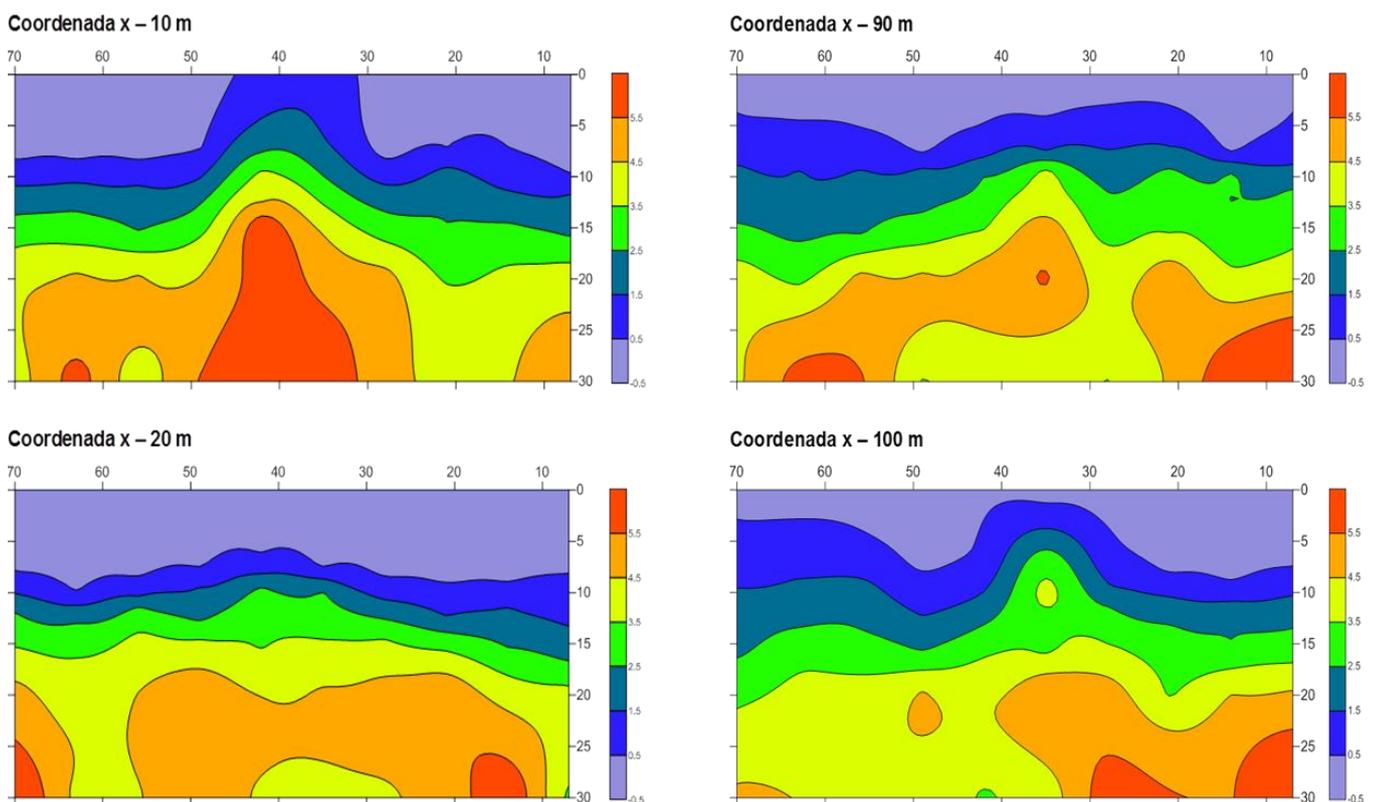


Figura 4 - Resistência do solo à penetração nas extremidades do campo em Megapascal (MPa).

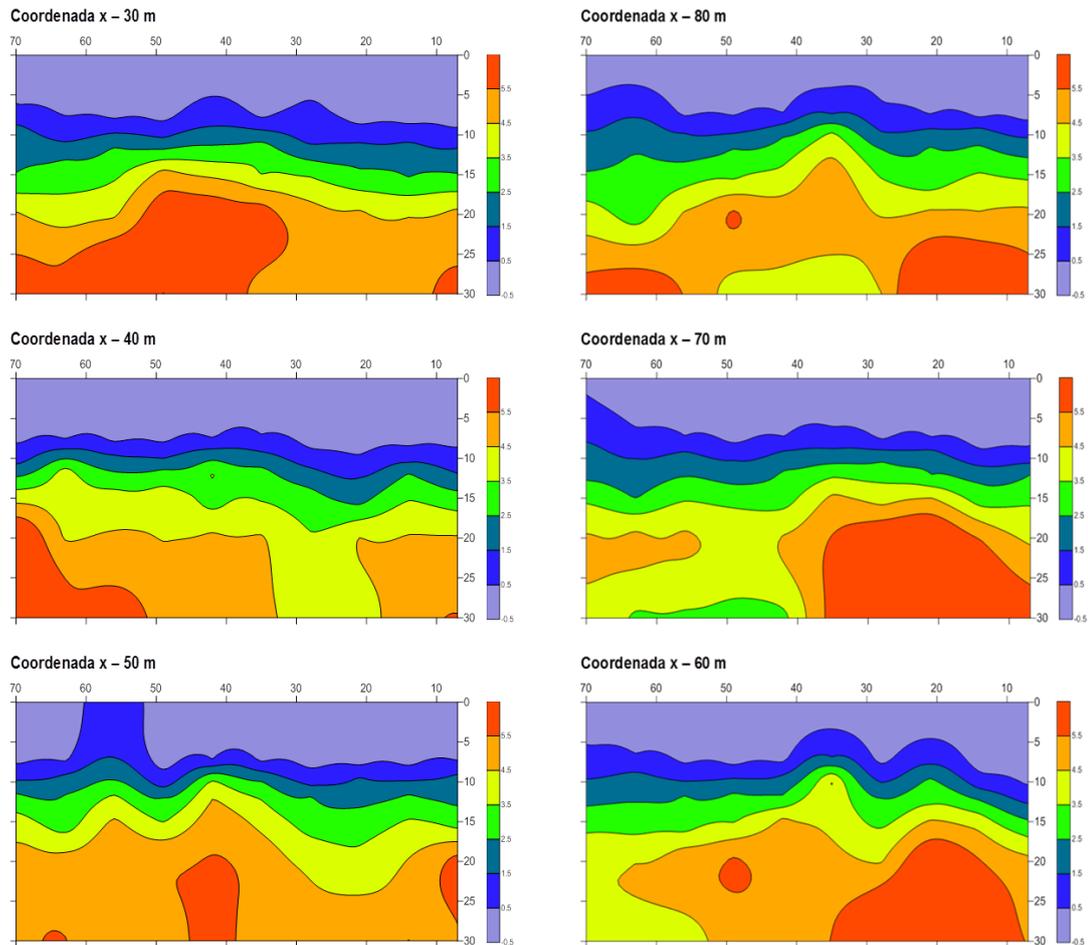


Figura 5 - Resistência do solo à penetração no centro do gramado em Megapascal (MPa).

Uma das maneiras mais comuns e ilustrativas de apresentar mapas de variáveis espaciais é através de isolinhas. Existem, basicamente, três maneiras de preparar os dados para a construção de mapas de isolinhas: (1) medir a variável em estudo no menor espaçamento possível; (2) medir em um espaçamento qualquer e interpolar usando programas computacionais; (3) medir num espaçamento que permita obtenção de dependência espacial e interpolar usando o método da krigagem (Vieira et al., 1981). A primeira é praticamente inviável, devido ao custo de amostragem e a análise. A segunda pode gerar isolinhas completamente diferentes da realidade, uma vez que os métodos utilizados por pacotes comerciais não consideram a variabilidade espacial durante a interpolação (Vieira et al., 1981). A terceira é a ideal porque pode reduzir o número de amostragem e interpolar sem tendenciosidade e com mínima variância do erro de interpolação (Burgess & Webster, 1980).

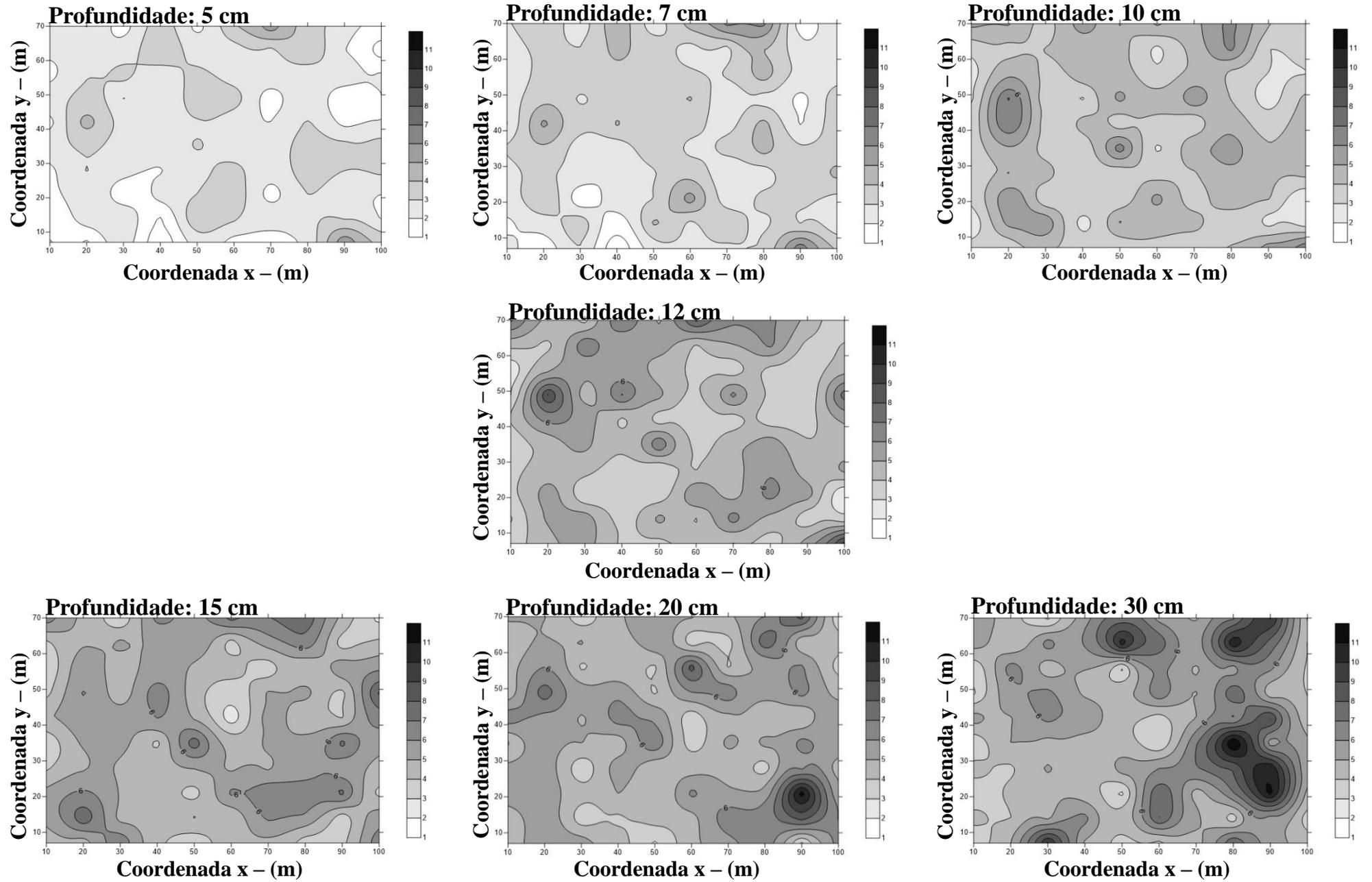


Figura 6 - Mapas de isolinhas dos dados de resistência do solo a penetração em Megapascal (MPa).

Segundo Corá e Beraldo (2006) os mapas de isolinhas elaborados por meio da krigagem, levando-se em consideração a existência de dependência espacial de atributos do solo, expressada no semivariograma, apresentaram maior precisão e diferentes padrões de ocorrência da distribuição espacial dos atributos, comparados aos mapas de isolinhas construídos utilizando-se do interpolador linear para estimativa dos valores em locais não medidos.

Andrade et al. (2005), analisando a variabilidade espacial da densidade do solo, concluíram que a construção dos mapas de isolinhas são de grande importância, pois permitiram o estabelecimento de subáreas com características de densidade do solo semelhantes, nas quais se pode realizar, de maneira eficiente, o planejamento e manejo da irrigação.

Porém, Mercante e colaboradores (2003) não verificaram diferenças entre os mapas de isolinhas sobre resistência mecânica do solo a penetração, gerados a partir dos parâmetros de ajustes dos semivariogramas individuais e escalonados.

5 CONCLUSÕES

Na profundidade de 5 cm, não há locais com níveis de resistência do solo à penetração que poderiam estar influenciando o crescimento do gramado.

A resistência do solo à penetração aumenta ao longo do perfil do solo estudado.

A resistência à penetração do solo no campo de futebol apresenta dependência espacial moderada em todas as profundidades estudadas.

REFERÊNCIAS

- ABREU, L.S. **Propriedades hídricas e mecânicas afetadas por sistemas de manejo e variabilidade espacial de um Argissolo**. 2000. 66f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.
- ALI HARIVANDI, M. **Turfgrass traffic and compaction: problems and solutions**. Berkeley: University of California, Agriculture and Natural Resources, 2002. 6 p.
- ANDRADE, A.R.S. et al. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 322-329, mar./abr. 2005.
- ARGENTON J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n.3, p.425-435, maio/jun. 2005.
- BARROS JÚNIOR, V. L. M., **Utilização do radar de penetração em dois solos do Norte Fluminense**. 2011, 72f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.
- BERTOLLO, A. M. et al. Variabilidade espacial e temporal da resistência à penetração em diferentes umidades de um Latossolo Vermelho. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânica, v. 9, n. 16, p. 2102-2110, 2013.
- BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W.H.; TORMENA, C.A.; FERREIRA, C.J.B.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n. 3 , p.971-982, maio/jun. 2012.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; SILVA, L.M. Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinamométrico em latossolos. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n.2, p. 191-199, maio 2002.
- BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **The Journal Soil Science**, Oxford, v.31, n.2, p. 315-331, June1980.
- 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 America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, Sept.1994.
- CARRIBEIRO, L. S. **Potencial de água no solo e níveis de compactação para o cultivo de grama esmeralda**, 2010. 72f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

CARROW, R. N. Influence of soil compaction on three turfgrass species. **Agronomy Journal**, Manhattan, v. 72, n.6 p.1038 -1042, Nov./Dec. 1980.

CARROW, R.N. **Soil compaction**. Manhattan.1981. p. 59-66. Golf course management.

CORÁ, J.; BERALDO, J. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 374-387, mai./ago.2006.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006. 306 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, **Mapa pedológico digital: SIG atualizado do Distrito Federal escala 1: 100.000 e uma síntese do texto explicativo**. Embrapa Cerrados, 2004.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

FREDDI, O.S.; CARVALHO, M.P.; VERONESE JUNIOR, V.; CARVALHO, G.J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 113-121, jan./abr.2006.

GUIMARÃES, E.C. Geoestatística básica e aplicada. Apostila de aulas. Núcleo de Estudos Estatísticos e Biométricos da Faculdade de Matemática, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG. ,2004. 78p.

LAIA, A.; MAIA, J.; KIM, M. Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 523-530, Abr./Jun. 2006.

LIMA, C.L.R.; MIOLA, E.C.C.; TIMM, L.C.; PAULETTO, E.A.; SILVA, A.P. Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.124, p.190-195, Aug. 2012.

MARASCA, I. et al. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água em sistema de plantio direto na cultura da soja. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 2,p.239-246, mar./abr.2011.

MEDEIROS, R. D.; SOARES, A. A.; GUIMARÃES, R. M. Compactação do solo e manejo da água. I: efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras. V.29, n. 5, p.940-947, set./out. 2005.

MERCANTE, E. et al. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p.1149-1159, 2003.

MODOLO, A.J.; FERNANDES, H.C.; SCHAEFER, G.C.E.; SILVEIRA, J.C.M. Efeito da compactação do solo sobre a emergência de plântulas de soja em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 4, p. 1259-1265, jul./ago. 2008.

MOLIN, J.P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 83-92, 2002.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura, Seção de Geografia, 1961. 38p.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M.C.C.; RODRIGUES, M. D. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 1103-1112, jul./ago. 2013.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S.; HORN, R. Mecânica do Solo. In: VAN LIER, Q, J. **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.29-102.

SAMPIETRO, J. A.; DA SILVA LOPES, Eduardo. Compactação de Cambissolo e Neossolo submetidos a diferentes intensidades de tráfego de Feller Buncher e Skidder. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 265-272, jun. 2011.

SANTOS, J. P. Uso de Geocomposto Drenante em Campos de Futebol, 2008. Disponível em: <http://gramadosmarilia.com.br/wp-content/uploads/2012/07/Drenagem-MacDrain.pdf>. Acesso em: 10 dezembro.2013.

SILVA, E. A. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; ROCHA, J. V.; SOUZA, E. G. Um estimador robusto e o semivariograma cruzado na análise de variabilidade espacial de atributos do solo e planta. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 365-371, 2003.

SILVA, V. R.; REICHERT J. M.; REINERT D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 399-406, mar./abr. 2004.

SILVEIRA, D.C. et al. Relação umidade *versus* resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 659-667, 2010.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. **Statistical methods**. 7.ed. Ames : Iowa State University, 1974. 507p.

SOUZA, Z.M.; SILVA, M.L.S.; GUIMARÃES, G.L.; CAMPOS, D.T.S.; CARVALHO, M.P.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta em Selvíria, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.699-707, 2001.

SOUZA, Z. M.; JUNIOR, J. M.; COOPER, M.; PEREIRA, G. T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 487-492, 2006.

TAVARES FILHO, J. et al. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n.3, p. 725-730, 2001.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999. 58 p. (Circular técnica, 23).

VENN, B.W.; BOONE, F.R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. **Soil and Tillage Research**, Edinburgh, v.16, n. 1-2, p.219-226, April.1990.

VIEIRA, S.R.; BRANCALIÃO, S.R.; GREGO, C.R.; MARTINS, A.L.M. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com leguminosas consorciadas com seringueira. **Bragantia**, Campinas, v.69, n. 2, p. 423-432, 2010.

VIEIRA, S.R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. In: NOVAIS, R.F. et al. (Eds). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-53.

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

VILLAMIL, M.B.; BOLLERO, G.A.; DARMODY, R.G.; SIMMONS, F.W. & BULLOCK, D.G. No-till corn/soybean systems including winter cover crops: Effects on soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, v.70, p.1936-1944, 2006.

WARRICK, A.W.; Nielsen, D.R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In:Hillel, D.(ed.). Applications of soil physics. New York: Academic Press, 1980.