

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

Eder Luís Sari

**TOMADA DE DECISÃO PARA OPERAÇÃO DE DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO
COM BASE EM ZONAS DE MANEJO**

Santa Maria, RS
Outubro de 2020

Eder Luís Sari

**TOMADA DE DECISÃO PARA OPERAÇÃO DE DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO
COM BASE EM ZONAS DE MANEJO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Agricultura de Precisão**.

Orientador: Prof^o Dr. Eduardo Leonel Bottega

Santa Maria, RS
Outubro de 2020

Sari, Eder Luís

TOMADA DE DECISÃO PARA OPERAÇÃO DE DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO COM BASE EM ZONAS DE MANEJO / Eder Luís Sari.- 2020. 45 p.; 30 cm

Orientador: Eduardo Leonel Bottega
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, RS, 2020

1. Agricultura de Precisão 2. Condutividade elétrica aparente do solo 3. Resistência do solo á penetração 4. Zonas de manejo 5. Plantio Direto I. Bottega, Eduardo Leonel II. Título.

Eder Luís Sari

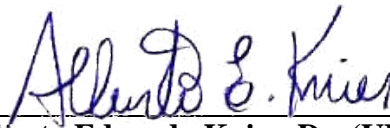
**TOMADA DE DECISÃO PARA OPERAÇÃO DE DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO
COM BASE EM ZONAS DE MANEJO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Agricultura de Precisão**.

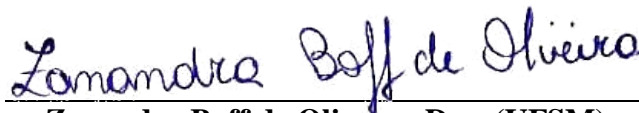
Aprovado em 30 de outubro de 2020:



Eduardo Leonel Bottega, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Alberto Eduardo Knies, Dr. (UERGS)
(Membro externo)



Zanandra Boff de Oliveira, Dra. (UFSM)
(UFSM)

Santa Maria, RS
Outubro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelos ensinamentos de sempre colocar Ele e as pessoas em primeiro lugar e iluminar meu caminho na jornada da vida.

A minha esposa Gabriele e minhas filhas Isabele e Manuela pela compreensão nos momentos da minha ausência para execução dessa atividade. Em especial a minha esposa que nos momentos de cansaço e/ou de dificuldades me incentivou sobremaneira para concluir esse trabalho.

A Agropecuária Barufaldi por ceder a área e o espaço para execução do experimento.

A empresa Falker nas pessoas do Márcio e Bruno por apoiar e disponibilizar o equipamento para mensuração da condutividade elétrica aparente do solo.

A empresa ConnectFarm, na pessoa do Eng. Agrônomo Rodrigo Dias por apoiar em todas as etapas o desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu orientador Eduardo Leonel Bottega um mais que especial agradecimento por toda orientação. Incansável e sempre solícito em atender minhas dúvidas. Do início ao fim, da coleta dos dados à interpretação e discussão dos resultados cumpriu com louvor seu desempenho na qualidade de orientador.

RESUMO

TOMADA DE DECISÃO PARA OPERAÇÃO DE DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO COM BASE EM ZONAS DE MANEJO

AUTOR: Eder Luís Sari

ORIENTADOR: Eduardo Leonel Bottega

Em um sistema de produção agrícola cada vez mais competitivo, otimizar o uso dos recursos disponíveis e obter rentabilidade com sustentabilidade no seu negócio deve ser o foco do produtor rural, da pesquisa e da extensão rural. Quando emprega-se a expressão “qualidade física do solo”, refere-se à capacidade física do solo em sustentar o pleno desenvolvimento de plantas. A principal causa da compactação em solos agrícolas é o tráfego de máquinas em operações de preparo, semeadura, tratos culturais e colheita, principalmente quando o solo está úmido demais. Conhecer a variabilidade dos atributos do solo é ferramenta importante no contexto da agricultura de precisão. Neste trabalho estudou-se a delimitação de zonas de manejo a partir do mapeamento da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) como ferramenta para tomada de decisão para operação de descompactação do solo. Delimitou-se zonas de manejo com base na variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo e caracterizou-se a resistência à penetração em cada zona de manejo delimitada. O trabalho foi realizado no município de Cachoeira do Sul, em uma área comercial destinada ao cultivo de grãos em sistema de plantio direto, sob pivô central. Foi estabelecida uma malha amostral composta por 95 pontos com espaçamento regular de 50 x 50 metros. Estes pontos serviram de base para coleta de dados de altitude em relação ao nível do mar, mensuração da resistência do solo à penetração (RP, MPa) e amostras para caracterização textural (0-20 cm). A condutividade elétrica aparente do solo foi mensurada utilizando o equipamento erram® da Falker Automação Agrícola. Como base nos dados de CEa foram delimitadas 04 zonas de manjo e logo após, dentro de cada zona foi medida a RP a fim de caracterizar cada zona e identificar a correlação entre as medidas de CEa e RP, variando entre as zonas de 0,9 MPa na camada 0-10 cm até 1,82 Mpa na camada 30-40 cm. Foi possível diferenciar valores de RP a partir das zonas geradas com base da variabilidade da CEa. Identificou-se por esse trabalho que o número mínimo de zonas deve ser três e a mensuração da CEa deve ser realizada quando o solo apresenta baixo teor de umidade.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Condutividade elétrica aparente do solo. Resistência do solo à penetração.

ABSTRACT

MAKING DECISION FOR THE SOIL DECOMPACTION OPERATION BASED ON MANAGEMENT ZONES

AUTHOR: EDER LUÍS SARI
ADVISOR: EDUARDO LEONEL BOTTEGA

In an increasingly competitive system, optimizing the use of available resources and obtaining profitability with sustainability in your rural business must be the focus of rural producers, research and rural extension. When we use the expression “physical soil quality”, we are referring to the physical capacity of the soil to sustain the full development of plants. The main cause of compaction in agricultural soils is the traffic of machines in operations of preparation, sowing, cultivation and harvesting, especially when the soil is too humid. Knowing the variability of soil attributes is an important tool in the context of precision agriculture. In this work, the delimitation of management zones was studied based on the mapping of the spatial variability of the apparent electrical conductivity of the soil as a tool for decision making for soil unpadding operation. Management zones were defined based on the spatial variability of the apparent electrical conductivity of the soil and the resistance to penetration in each defined management zone was characterized. The work was carried out in the municipality of Cachoeira do Sul, in a commercial area for the cultivation of grains under no-tillage system, under central pivot. A sample grid composed of 95 points with a regular spacing of 50 x 50 meters was established. These points served as a basis for collecting altitude data in relation to sea level, measuring soil resistance to penetration (RP, MPa) and samples for textural characterization (0-20 cm). The apparent electrical conductivity of the soil was measured using Falker Automação Agrícola's Terram® equipment. Based on CEa data, mangrove zones were delimited and soon afterwards, PR was measured within each zone in order to characterize each zone and identify the correlation between the CEa and PR measurements. It was possible to differentiate RP values from the zones generated based on the CEa variability. It was identified that the minimum number of zones should be three and the measurement of CEa should be performed when the soil has low moisture content.

Keywords: Precision Agriculture. Apparent soil electrical conductivity. Penetration resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Polígono da área de estudos e pontos amostrais utilizados como base na mensuração da resistência do solo à penetração (R_p , MPa) e coleta de amostras de solo (A) para determinação da umidade (pontos circulosados em vermelho) e modelo digital de elevação do terreno (B).....	19
Figura 2 – Medidor comercial de condutividade elétrica do solo Terram (A) e sistema de navegação e aquisição de dados Fieldbox (B), da Falker Automação Agrícola LTDA. Fonte: www.falker.com.br	20
Figura 3 – Conjunto quadriciclo e Terram (A) e mapa de pontos de leitura da CE do solo (B). Fonte: Autor.....	21
Figura 4 – Conjunto quadriciclo e penetrógrafo Solo Star Falker. Fonte: Autor	21
Figura 5 – Pontos amostrais utilizados na análise de correlação de Pearson ($p < 0,05$) entre os valores mensurados de condutividade elétrica aparente do solo (CE_a , $mS\ m^{-1}$) e resistência à penetração (RP , MPa).....	24
Figura 6 – Modelos teóricos de semivariância, parâmetros geoestatísticos e gráficos de validação cruzada da modelagem da dependência espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CE_a , $mS\ m^{-1}$) mensurada em 13/11/2018 (A e B) e em 17/11/2018 (C e D).....	28
Figura 7 – Modelos teóricos de semivariância, parâmetros geoestatísticos e gráficos de validação cruzada da modelagem da dependência espacial da resistência do solo à penetração (RP , MPa) nas profundidades de 0 – 10 cm (A e B) e 10 – 20 cm (C)	29
Figura 7 – (Continuação) Modelos teóricos de semivariância, parâmetros geoestatísticos e gráficos de validação cruzada da modelagem da dependência espacial da resistência do solo à penetração (RP , MPa) nas profundidades de 20 – 30 cm (D e E) e 30 – 40 cm (F e G).....	30
Figura 8 – Mapas temáticos representativos da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CE_a ; $mS\ m^{-1}$) mensurada em 13/11/2018 (A) e em 17/11/2018 (B) e da resistência do solo à penetração (RP , MPa) nas camadas de 0 – 10 cm (C), 20 – 30 cm (D) e 30 – 40 cm (E)	31
Figura 9 – Mapas de zonas de manejo (ZM) delimitado com base na mensuração de condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) efetuada em 13 de novembro de 2018, organizados em 2 classes (A), 3 classes (B) e 4 classes (C).....	33
Figura 10 – Gráficos Box-Plot para valores de resistência à penetração do solo (RP ; MPa) que apresentaram diferença estatística significativa pelo teste t ($p < 0,05$) em função do número de classes (C) do mapa de zonas de manejo (ZM) delimitado com base nas leituras de condutividade elétrica aparente do solo efetuadas em 13 de novembro de 2018.....	36
Figura 11 – Mapas de zonas de manejo (ZM) delimitado com base na mensuração de condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) efetuada em 17 de novembro de 2018, organizados em 2 classes (A), 3 classes (B) e 4 classes (C).....	37
Figura 12 – Gráfico Box-Plot para valores de resistência à penetração do solo (RP ; MPa) que apresentaram diferença estatística significativa pelo teste t ($p < 0,05$) em função do número de classes (C) do mapa de zonas de manejo (ZM) delimitado com base nas leituras de condutividade elétrica aparente do solo efetuadas em 17 de novembro de 2018.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo estatístico descritivo da condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m ⁻¹) mensurada na área de estudos em duas datas.....	25
Tabela 2 – Resumo estatístico descritivo da resistência do solo á penetração (RP, MPa), mensurada em 17 de novembro de 2018	26
Tabela 3 – Correlação de Pearson entre a condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m ⁻¹) mensurada em duas condições de umidade e a resistência do solo á penetração (RP, MPa).....	27
Tabela 4 – Número de pontos amostrais (N), desvio padrão (DP), valor do teste de normalidade de Shapiro-Wilk (W) e significância do teste de normalidade (p-valor) para os valores de resistência à penetração do solo (RP; MPa), nas diferentes camadas estudadas, para cada classe dos mapas de zonas de manejo (ZM) gerados com base na mensuração de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) efetuada em 13 de novembro de 2018	34
Tabela 5 – Teste de médias (p<0,05) para os valores de resistência à penetração do solo (RP; MPa), nas diferentes camadas estudadas, para cada classe dos mapas de zonas de manejo (ZM) gerados com base na mensuração de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) efetuada em 13 de novembro de 2018	34
Tabela 6 – Número de pontos amostrais (N), desvio padrão (DP), valor do teste de normalidade de Shapiro-Wilk (W) e significância do teste de normalidade (p-valor) para os valores de resistência à penetração do solo (RP; MPa), nas diferentes camadas estudadas, para cada classe dos mapas de zonas de manejo (ZM) gerados com base na mensuração de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) efetuada em 17 de novembro de 2018	38
Tabela 7 – Teste de médias para os valores de resistência à penetração do solo (RP; MPa), nas diferentes camadas estudadas, para cada classe dos mapas de zonas de manejo (ZM) gerados com base na mensuração de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) efetuada em 17 de novembro de 2018	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL.....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1 RESISTÊNCIA DO SOLO Á PENETRAÇÃO DE RAÍZES.....	14
2.2 AGRICULTURA DE PRECISÃO.....	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1. ÁREA EXPERIMENTAL.....	19
3.2 MENSURAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO (CEa).....	20
3.3 MENSURAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO SOLO Á PENETRAÇÃO (RP).....	21
3.4 MODELAGEM DA DEPENDÊNCIA ESPACIAL	22
3.5 DELIMITAÇÃO DAS ZONAS DE MANEJO	23
3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA E ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON DOS ATRIBUTOS CEa E RP	25
4.2 MODELAGEM DA DEPENDÊNCIA ESPACIAL DA CEa E RP	27
4.3 DELIMITAÇÃO DAS ZONAS DE MANEJO E TESTE DE MÉDIAS	32
5. CONCLUSÕES.....	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1. INTRODUÇÃO

Em um sistema cada vez mais competitivo, com margens econômicas cada vez menores, a agricultura brasileira precisa se adaptar rapidamente as novas tendências e exigências de mercado e da sociedade. Otimizar o uso dos recursos disponíveis para atender essas demandas e obter rentabilidade com sustentabilidade no seu negócio deve ser o foco do produtor rural, da pesquisa e da extensão rural.

Melhorias do processo produtivo, sejam elas em ganhos de produtividade das culturas ou na otimização do uso de insumos, passam, obrigatoriamente, por um adequado manejo do solo, buscando garantir sua qualidade química, física e biológica. Quando emprega-se a expressão “qualidade física do solo”, pode-se referir à capacidade física do solo em sustentar o pleno desenvolvimento das plantas. Neste contexto, a resistência do solo à penetração (RP) se destaca, pois, indica o grau de compactação de um solo agrícola (EMBRAPA, 2007)

O solo pode apresentar diferentes graus de compactação, sendo que a partir de um determinado valor, tem-se a restrição do crescimento radicular das plantas, comprometendo a produtividade. O grau de compactação do solo é resultante do histórico de tensões recebidas em uma área. A principal causa da compactação em solos agrícolas é o tráfego de máquinas em operações de preparo, semeadura, tratos culturais e colheita, principalmente quando o solo está úmido demais.

Há controvérsia sobre que atributos utilizar para considerar se um solo está compactado. Uma das propriedades físicas alteradas pelo sistema de manejo do solo é a resistência mecânica à penetração de raízes. Alguns pesquisadores sugerem que o fator que mais limita o crescimento radicular é, justamente, essa resistência, que pode ser mensurada utilizando um equipamento conhecido por penetrômetro (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003).

Atualmente, com emprego de tecnologias geoespaciais no campo, tornou-se possível se conhecer a variabilidade espacial de atributos que influenciam na produtividade das culturas, dentre eles, a RP. Um fator que pode comprometer a viabilidade financeira de se mapear a RP do solo é a necessidade de um levantamento detalhado, realizado mediante a mensuração da RP em uma grande quantidade de pontos amostrais distribuídos ao longo da área.

Neste contexto, o mapeamento de um atributo do solo, que apresente relação direta ou indireta com a compactação, seja de rápida aquisição, baixo custo de mensuração e possibilite elevada densidade amostral, merece atenção. A condutividade elétrica aparente do solo pode ser um desses atributos, entretanto, necessita-se de maior estudo para este fim.

Acredita-se que, a partir do mapeamento da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo, seja possível definir zonas de manejo capazes de diferenciar os graus de compactação do solo em uma área de cultivo. A partir da caracterização da RP destas zonas de manejo, tem-se a possibilidade de realizar intervenções localizadas de descompactação do solo. As ações de descompactação poderiam ser realizadas, em cada zona, em função do grau de compactação, através de práticas mecânicas e/ou culturais, de forma a garantir melhorias na produtividade e rentabilidade das lavouras.

1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a delimitação de zonas de manejo a partir do mapeamento da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo como ferramenta para tomada de decisão para operação de descompactação do solo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Mapear a variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo.

Delimitar zonas de manejo com base na variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo.

Caracterizar a resistência à penetração em cada zona de manejo delimitada.

Estudar a relação entre a variação da magnitude da resistência do solo à penetração com a variação da magnitude da condutividade elétrica aparente do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO DE RAÍZES

A compactação do solo é um fenômeno físico que tem sido associado à diminuição da produtividade de culturas (BEUTLER; CENTURION, 2003; BEUTLER *et al.*, 2004; ROQUE *et al.*, 2008). Causada por tensões que surgem na interface solo/pneu e solo/implemento, pela aplicação de cargas dinâmicas ao solo, por rodados e implementos agrícolas durante o manejo (FLOWERS; LAL, 1998; SILVA *et al.*, 2003), ela se caracteriza pela aglutinação das partículas primárias do solo, mudanças em propriedades físicas relacionadas ao volume de espaço vazio do solo, redução do crescimento e da distribuição de raízes e suas consequências (STONE; GUIMARÃES; MOREIRA, 2002; SILVA *et al.*, 2003; STIRZAKER; PASSIOURA; WILMS, 1996).

A compactação do solo ocorre quando o solo está sujeito a pressões mecânicas e pode ser caracterizada pela resistência que este oferece a uma determinada força exercida sobre o mesmo. Esta resistência é um índice integrado, ou seja, uma consequência da compactação, da umidade, da textura, do tipo mineral das argilas, da quantidade e tipo do agregado e porosidade do solo (FOLEGATTI *et al.*, 1990). Existem alguns fatores que influenciam na resistência, como por exemplo, o sistema de cultivo que interfere no grau de revolvimento do solo, desde o menor revolvimento possível como no plantio direto, até o revolvimento total, como no plantio convencional (CORRECHEL *et al.*, 1997); da mesma forma, o cultivo rotacionado, por exemplo, proporciona menor compactação do solo que monocultivo (PEDROTTI *et al.*, 2001).

A RP tem sido usada como um indicador do estado de compactação de solos cultivados em relação à sua condição natural (SILVA *et al.*, 2004). RP é um dos atributos físicos do solo que influencia o crescimento de raízes e serve como base à avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo do solo sobre o ambiente radicular (TORMENA; ROLOFF, 1996). A RP, além de depender de fatores intrínsecos do solo (textura, estrutura e mineralogia), é altamente dependente da umidade do solo (SILVA *et al.*, 2002). Em condição de baixa umidade ocorre maior resistência à deformação ou à penetração de raízes. Com o aumento do teor de água, decresce a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno, incorrendo em redução da RP (CUNHA *et al.*, 2002).

Para medir a RP o equipamento utilizado para tal denomina-se penetrômetro. A avaliação da resistência do solo à penetração pode ser realizada pelo índice de cone (IC), definido como a resistência do solo à penetração de uma ponta cônica, e expressa como a força

por unidade de área da base do cone. Durante as medições de resistência de um determinado solo, o IC varia em função de atributos como densidade aparente e conteúdo de água no solo (SÁ, 2007).

Molin; Magalhães; Faulin (2006), observaram em uma lavoura sob semeadura direta que o IC foi influenciado principalmente pelo teor de água, densidade e espaço poroso do solo. Assim, o monitoramento periódico de áreas agrícolas, com penetrômetro, pode-se determinar facilmente o grau de compactação do solo e, conseqüentemente, a condição de penetração das raízes (RIBON *et al.*, 2003). O valor da RP normalmente utilizado como limitante é de 2,0 MPa (LIMA *et al.*, 2012). 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).

A compactação do solo de áreas de cultivo não é uniforme e depende de fatores externos (tipo, intensidade e frequência de carga aplicada) e internos (umidade, textura, estrutura, teor de carbono, densidade inicial do solo e histórico de tensões) ao solo (RICHART *et al.*, 2005). A profundidade de compactação varia com o sistema de manejo do solo, sendo superficial para o sistema de plantio direto (8 a 15 cm) e subsuperficial para os sistemas de preparo mínimo e convencional (>20 cm) (CENTURION; DEMATTÊ, 1985; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

Estes fatos magnificam a importância de se desenvolver procedimentos expeditos para a localização e o dimensionamento de camadas compactadas, ou seja, zonas de manejo específico capazes de diferenciar os graus de compactação do solo. A elaboração de mapas, descrevendo a variabilidade da RP, pode permitir que sua análise e interpretação se constituam em valiosa ferramenta de apoio para decisões gerenciais, visando a otimização do uso de equipamentos agrícolas que compõem o sistema mecanizado, o aumento da capacidade efetiva de trabalho, a economia de combustíveis, o cumprimento do cronograma de trabalho e, conseqüentemente, a melhoria contínua do processo produtivo. (CHIG; OLIVEIRA; CRESTANI, 2014)

2.2 AGRICULTURA DE PRECISÃO

A agricultura de precisão (AP) foi definida por Pierce; Nowak (1999) como o processo pelo qual garante-se a uniformização da eficiência em cada metro quadrado da área de manejo, otimizando a produção e diminuindo a variabilidade das áreas da lavoura. De acordo com

Miranda *et al.* (2017), esse processo se dá através da implantação de ferramentas de sistemas de informação e maquinário adaptado, aliada a adoção de técnicas de tratamento de cada área de acordo com as suas deficiências e as suas potencialidades.

A implantação da AP só foi possível a partir do advento do Sistema por Satélite de Navegação Global, mais conhecido como GPS, a partir do ano de 1978 nos Estados Unidos, sendo possível ser acoplado a microprocessadores e realizar o levantamento de dados do solo e do clima, gerando uma grande difusão da agricultura de precisão em vários países com produção agrícola, incluindo o Brasil (BERNARDI *et al.*, 2014). No Brasil, em 1995, foi iniciada a comercialização de colhedoras com capacidade de mapeamento da produção (MAPA, 2013)

A tecnologia empregada no campo foi determinante para que a agricultura brasileira alcançasse o patamar atual. A evolução é contínua e agora se consolida uma nova era de tecnologia agrícola. Hoje já não existe mais separação entre os mundos físico e virtual, conectados para facilitar a vida das pessoas. Por trás dessa ideia está o conceito da Agricultura 4.0 (Agro 4.0), também chamada de agricultura digital (MASSRUHÁ; LEITE, 2017)

Em 2012, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), ao instituir a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão (CBAP), definiu a Agricultura de Precisão como “um sistema de gerenciamento agrícola baseada na variação espacial e temporal da unidade produtiva e visa ao aumento de retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização do efeito ao ambiente” (BRASIL, 2012, p. 6). A AP pode ser entendida como uma forma de gestão da lavoura que leva em conta a variabilidade espacial. Recomenda-se somente se houver potencial de retorno econômico e ambiental e nesse caso é necessário que haja a variabilidade espacial. O retorno econômico, portanto, depende de cada lavoura e dos processos de cada produtor (BERNARDI *et al.*, 2014).

O primeiro passo na implantação da AP, é identificar a variabilidade espacial da lavoura. Mapas de produtividade, mapas de condutividade elétrica aparente do solo, imagens aéreas (sensoriamentos remotos e próximos), topografia (paisagem) com pedologia refinada podem chegar a uma continuidade de leitura ou de dados a cada três metros com custo razoável e essas medidas indicam indiretamente como ocorre a variabilidade da lavoura.

Essas indicações indiretas são medidas que auxiliam e orientam uma amostragem mais estratégica, reduzindo a necessidade de um número elevado de amostras colhidas às cegas em uma distância regular em grade (BERNARDI *et al.*, 2014).

O uso da condutividade elétrica aparente do solo tem demonstrado como uma importante ferramenta para os trabalhos de agricultura de precisão. Sua facilidade, simplicidade

e praticidade leva a economia de tempo e custo na realização das tomadas de decisões das áreas de manejo e de variabilidade espacial das áreas de estudos (BERNARDI *et al.*, 2014).

De acordo com Bernardi *et al.*, (2014) a variabilidade espacial em culturas e o resultado de uma complexa interação de fatores, tais como, biológico (micróbios, vermes etc.), edáfico (salinidade, matéria orgânica, nutrientes, etc.), antrópico (atividades humanas, compactação do solo devido a máquinas agrícolas), topografia (relevo, elevação) e climático (umidade relativa, temperatura, etc.).

Bullock; Bullock (2000), em seu trabalho demonstram a importância das medidas das variações das propriedades físicas e químicas do solo em agricultura de precisão. A medição da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) é uma tecnologia que se tornou uma ferramenta valiosa para identificar as características físico-químicas do solo que influenciam os padrões de rendimento das culturas e para estabelecer a variação espacial dessas propriedades do solo (CORWIN *et al.*, 2003).

A correlação existente entre a CEa do solo com atributos químicos e físicos do solo, tem sido apresentada em diversos trabalhos científicos (MORAL *et al.*, 2010; RODRÍGUEZ-PÉREZ *et al.*, 2011). Oliveira, Franchini, Debiasi (2011), conduziram um estudo da correlação espacial da produtividade da soja e da condutividade elétrica do solo em um Latossolo Bruno. Os autores observaram que a CEa e a produtividade da soja apresentaram dependência espacial. A produtividade da soja foi inversamente correlacionada com a CEa, indicando que esta característica do solo pode ser útil na definição de zonas de manejos diferenciadas dentro de uma lavoura.

A CEa, nos últimos anos, tem sido empregada como indicador da variabilidade espacial existente em uma área agrícola (CORWIN; LESCH, 2003), dada sua relação com atributos do solo conforme já mencionado anteriormente. Seu mapeamento é rápido, de baixo custo e possibilita, utilizando os equipamentos comerciais disponíveis no mercado, um detalhamento com vários pontos de mensuração por hectare. Por estes motivos, pesquisas que buscam entender a relação da CEa com atributos do solo, buscando soluções comerciais de uso desta ferramenta, merecem destaque. Em especial, aqueles que objetivam a delimitação de zonas de manejo.

Zona de manejo pode ser entendida como uma sub-região do campo que apresenta uma mesma combinação de fatores limitantes de produtividade e de qualidade para a qual se pode aplicar uma dose uniforme de insumos (RODRIGUES JUNIOR *et al.*, 2011). A utilização de zonas de manejo, na maioria das vezes, está associada as ações de correção e adubação do solo, considerando a variabilidade espacial dos nutrientes (FU *et al.*, 2010).

Neste cenário, o mapeamento da variabilidade espacial dos nutrientes é chave, porém, a variabilidade espacial dos nutrientes pode não ser igual entre eles (ZANÃO JÚNIOR *et al.*, 2007). Alguns nutrientes necessitam de maior número de amostras que outros para que se possa conhecer o seu comportamento em uma determinada área. Este fato é entendido pois as variações nos teores dos elementos essenciais do solo não é a mesma para todos.

O manejo de uma cultura em sitio-especifico objetiva a orientar o manejo do solo, pragas e na cultura de acordo com a sua variação espacial dentro do campo (LARSON; ROBERT, 1991). Estudos conduzidos por Milani *et al.* (2006) relatam que áreas onde se aplicou o manejo localizado foi observada menor variabilidade da produtividade.

Mas para que o manejo localizado seja efetivo, se faz necessário um estudo adequado da variabilidade espacial, isso só é possível através do emprego de técnicas geoestatísticas. A geoestatística é uma ferramenta estatística utilizada para estudar a variabilidade espacial e possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (VIEIRA *et al.*, 2002).

Após a quantificação da dependência espacial de um atributo (determinação do efeito pepita, variância estrutural e alcance) e o ajuste de um modelo matemático ao semivariograma experimental, procede-se a validação do modelo pela técnica de validação cruzada. Na validação cruzada é possível quantificar a incerteza associada a estimativa de valores em locais não amostrados. A estimativa de valores do atributo para locais não amostrados, é efetuada por meio de uma técnica de interpolação denominada krigagem. Através da krigagem, é possível gerar mapas dos atributos amostrados na área de interesse (GONÇALVEZ *et al.*, 2001).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

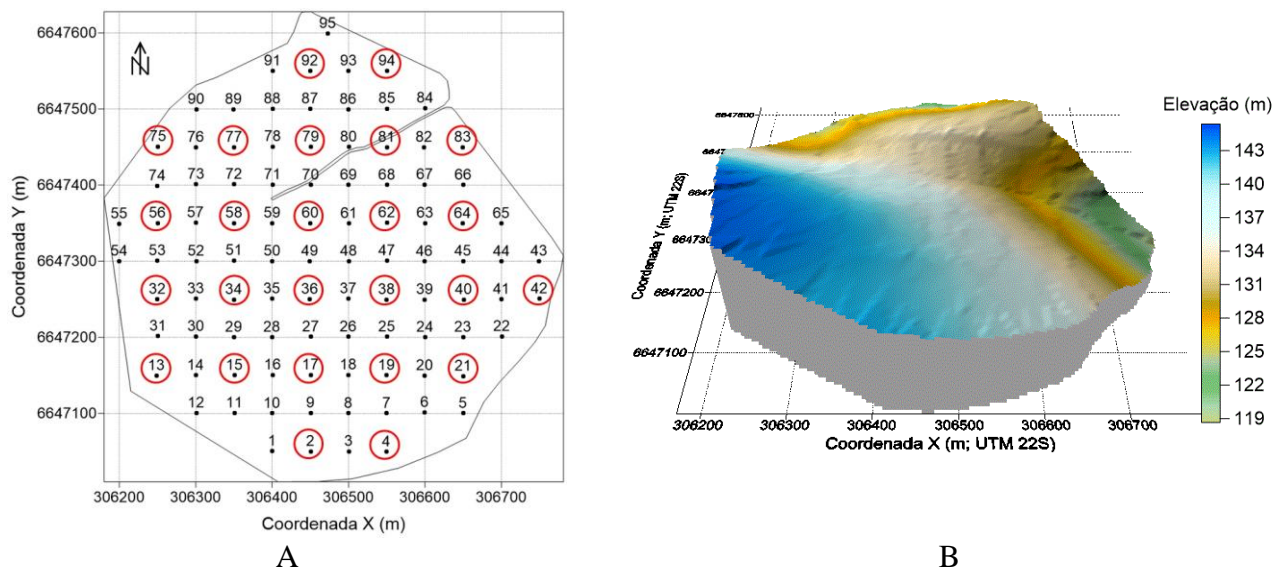
3.1. ÁREA EXPERIMENTAL

O trabalho foi realizado no município de Cachoeira do Sul, estado do Rio Grande do Sul, em uma área comercial destinada ao cultivo de grãos em sistema de plantio direto, sob pivô central, com 25,8 hectares. O pivô central não foi utilizado durante a realização do trabalho. O estudo foi realizado na entressafra na condição de resteva de trigo. O solo da região é classificado como ARGISSOLO Vermelho (EMBRAPA, 2013). Foi estabelecida uma malha amostral composta por 95 pontos (Fig. 1a), com espaçamento regular de 50 x 50 metros. Estes pontos serviram de base para coleta de dados de altitude em relação ao nível do mar, mensuração da resistência do solo à penetração (RP, MPa) e amostras para caracterização textural (0-20 cm).

Utilizou-se um receptor GPS da marca Garmin, modelo GPSMAP 62sc para localização dos pontos amostrais na área e obtenção do valor de altitude em relação ao nível do mar. O solo da área de estudo apresentou valores médios de 340 g kg⁻¹ de argila, 460 g kg⁻¹ de areia e 20 g kg⁻¹ de silte, sendo classificado como de textura média (EMBRAPA, 2013).

Na Figura 1 são apresentados o mapa de pontos amostrais (Fig. 1A) e o mapa representativo do modelo digital de elevação da área de estudo (Fig. 1B).

Figura 1 – Polígono da área de estudos e pontos amostrais utilizados como base na mensuração da resistência do solo á penetração (Rp, MPa) e coleta de amostras de solo (A) para determinação da umidade (pontos circulado em vermelho) e modelo digital de elevação do terreno (B)



3.2 MENSURAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO (CEa)

A condutividade elétrica aparente do solo foi mensurada nos dias 13/11/2018, sendo que nesse dia o solo apresentava baixa umidade, ($13,7 \text{ kg kg}^{-1}$) e no dia 17/11/2018, sendo essa segunda mensuração realizada 2 dias após uma chuva de 70 mm, utilizando o equipamento Terram® da Falker Automação Agrícola. O Terram (Fig. 2A) é um equipamento constituído por um chassi onde são montados quatro discos igualmente espaçados em 0,25 metros, medindo assim a CEa até 0,25 m de profundidade. Pesos são adicionados ao chassi para garantir o corte da palhada e o contato dos discos com o solo. Os discos internos atuam como eletrodos potenciais e os externos como eletrodos de corrente. A condutividade elétrica do solo é obtida a partir do inverso da resistividade elétrica do solo mensurada pela diferença potencial entre a corrente emitida e aquela recebida. Os dados coletados foram gravados no sistema Fieldbox (Fig. 2B), de fabricação da mesma empresa.

Figura 2 – Medidor comercial de condutividade elétrica do solo Terram (A) e sistema de navegação e aquisição de dados Fieldbox (B), da Falker Automação Agrícola LTDA. Fonte: www.falker.com.br



O Terram foi tracionado por um quadriciclo, no momento das leituras a área de estudos encontrava-se coberta por palhada de trigo (Fig 3A). Foram obtidas, na mensuração da CEa, 4.485 leituras (Fig. 3B).

Figura 3 – Conjunto quadriciclo e Terram (A) e mapa de pontos de leitura da CE do solo (B).
Fonte: Autor



A

B

3.3 MENSURAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO SOLO Á PENETRAÇÃO (RP)

A mensuração da RP foi realizada no dia 17/11/2018, quando o solo apresentava condições ideais de umidade para a mensuração.

A RP foi mensurada utilizando o penetrógrafo Solo Star da empresa Falker (Figura 4), modelo PLG5500 - Sistema automatizado para medição da compactação do solo.

Figura 4 – Conjunto quadriciclo e penetrógrafo Solo Star Falker. Fonte: Autor



Foi utilizado o cone tipo 2. O equipamento permite a detecção de áreas de solo compactado através da medição eletrônica da resistência à penetração (Índice de Cone) juntamente com a medição de profundidade. Um receptor GPS pode ser conectado ao equipamento para o registro da localização geográfica de cada medição.

Os dados podem ser transferidos para um computador, para visualização e análise. Com o sistema SoloStar a medição de compactação pode ser feita de modo automático. É necessário apenas que seja acionado o botão iniciar localizado no painel de controle. A medição tem início quando a ponta do cone toca o solo e é encerrada quando alcançados 60 cm de profundidade (podendo ser configurado, também, para medições de 20 e 40 cm, profundidade utilizada nesse estudo), sendo os dados salvos na memória de modo automático.

O sistema mede a força necessária para que a haste penetre o solo em diferentes profundidades, com intervalos configuráveis para 1 cm, 2,5 cm ou 5 cm. As coletas do trabalho foram feitas até 40 cm com intervalos de 1 cm.

3.4 MODELAGEM DA DEPENDÊNCIA ESPACIAL

A dependência espacial foi avaliada pelos ajustes de variogramas, pressupondo a estacionaridade da hipótese intrínseca, definida pela Equação 3.

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

Em que;

$\hat{\gamma}(h)$ = Semivariância em função da distância de separação (h) entre pares de pontos;

h = Distância de separação entre pares de pontos, m;

N (h) = Número de pares experimentais de observações Z(x_i) e Z (x_i + h) separados por uma distância h.

Foram testados os modelos gaussiano, esférico e exponencial. Ajustou-se o modelo que apresentou a menor soma dos quadrados do resíduo (OLIVER; WEBSTER, 2014). O modelo selecionado foi avaliado pela técnica de validação cruzada, que consiste em plotar em um gráfico os valores observados em campo *versus* aqueles estimados pelo modelo selecionado.

A precisão do modelo é refletida pelos parâmetros obtidos na análise de validação cruzada, que são eles: coeficiente de determinação (quanto mais próximo de 1, mais precisas

são as estimativas), erro padrão de predição (quanto menor, mais precisas são as estimativas) e intercepto (quanto mais próximo de zero, mais precisas são as estimativas).

Após a escolha do modelo, foram determinados os parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C_1$), alcance (A), coeficiente de determinação do ajuste (r^2) e soma de quadrados do resíduo (SQR). As análises geoestatísticas foram realizadas utilizando o programa computacional GS+, versão 7 (GAMMA DESIGN, 2006).

3.5 DELIMITAÇÃO DAS ZONAS DE MANEJO

A partir dos arquivos de dados krigados, originados na análise geoestatística, foram delimitadas as zonas de manejo, com base nas mensurações de CEa nas duas datas de amostragem. A delimitação de zonas de manejo foi realizada utilizando o programa computacional KrigMe, desenvolvido por VALENTE (2010). O programa utiliza o algoritmo de classificação *Fuzzy k-means* na análise de agrupamento dos dados e geração das classes. Foram gerados mapas de zonas de manejo com 2, 3 e 4 classes, para cada uma das datas de leituras de CEa.

3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

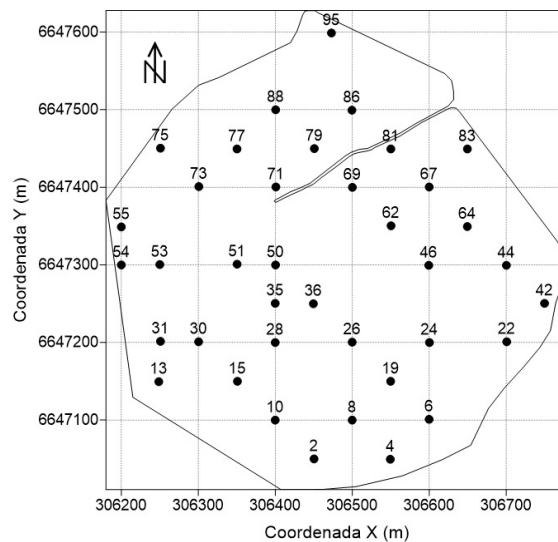
Em função do elevado volume de informação coletada pelo medidor de condutividade elétrica do solo, inicialmente realizou-se uma filtragem dos dados, sendo removidos aqueles considerados discrepantes. Para identificação destes, foi utilizado método proposto de Libardi *et al.* (1996), segundo a qual o limite crítico para estes valores é definido a partir da dispersão interquartil (DQ), sendo o limite superior definido por ($Q3 + 1,5 \times DQ$) e o inferior por ($Q1 - 1,5 \times DQ$), em que Q1 e Q3 são o primeiro e o terceiro quartil, respectivamente.

Após a remoção dos valores discrepantes, realizou-se uma interpolação de valores para produção dos mapas de CEa. O mapa de pontos amostrais foi sobreposto ao mapa interpolado, assim, foi possível extrair o valor de CEa em cada um dos 95 pontos da grade amostral (Fig. 1A), sendo estes, utilizados na análise estatística descritiva, correlação de Pearson e teste de médias Tukey ($p < 0,05$).

Os dados de CEa ($mS\ m^{-1}$), mensurados para as duas datas de amostragem, e de RP (MPa), obtidos para as quatro camadas de solo, correspondentes as mensurações nos 95 pontos

amostrais, foram submetidos à análise estatística descritiva, calculando-se a média, valor mínimo, valor máximo, desvio padrão e coeficiente de variação, a fim de fazer a caracterização. Dos 95 pontos amostrais, 38 foram selecionados para serem utilizados na análise de correlação de Pearson (Fig. 5). Montgomery; Runger (2009) enfatizam que o número de pontos utilizados na análise de correlação influencia de forma tendenciosa o teste de hipótese. Quanto maior o número de pontos, maior a chance de rejeição da hipótese de nulidade.

Figura 5 – Pontos amostrais utilizados na análise de correlação de Pearson ($p < 0,05$) entre os valores mensurados de condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m^{-1}) e resistência à penetração (RP, MPa)



Para o teste de médias, o mapa de pontos amostrais de solo foi sobreposto aos mapas de zonas de manejo anteriormente confeccionados. Os pontos amostrais pertencentes a cada classe do mapa de zonas de manejo foram identificados e seus valores compuseram o banco de dados utilizado para o teste de médias. Pontos amostrais muito próximos dos limites de cada zona de manejo não foram considerados na análise estatística, buscando com isso reduzir erros associados à caracterização de cada zona. Posteriormente foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk (W ; $p < 0,05$), premissa básica para a execução do teste de médias t . As classes de manejo em que os valores de RP apresentaram distribuição normal, foram então submetidos ao teste de médias t ($p < 0,05$), com o objetivo de identificar se as zonas de manejo geradas a partir da mensuração da CEa foram capazes de diferenciar os níveis de RP do solo. As análises estatísticas foram realizadas no software Statistica, versão 7 (STATSOFT, 2004).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA E ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Na Tabela 1 é apresentado o resumo estatístico para as leituras de CEa nas duas datas em que foram realizadas. Maior valor médio e menor CV% foi obtido para leituras efetuadas no dia 17/11/2018, dois dias após chuva de 70 mm. Esse fato pode ser explicado pois o solo pode conduzir corrente elétrica através da água intersticial que contem eletrólitos dissolvidos e através dos cátions trocáveis que residem por toda superfície de partículas de solo carregadas e são eletricamente móveis em vários níveis. (NADLER; FRENKEL, 1980). A condutividade elétrica depende em larga escala da solução eletrolítica existente no solo ao invés das partículas sólidas do mesmo. Portanto, o nível da condutividade elétrica de um solo é principalmente devido ao seu teor de água e do teor de sais dissolvidos nele (FREELAND, 1989).

Tabela 1 – Resumo estatístico descritivo da condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m⁻¹) mensurada na área de estudos em duas datas

Atributo do solo	Profundidade (cm)	Parâmetros estatísticos	13/11/2018 ⁽¹⁾	17/11/2018 ⁽²⁾
			baixa umidade	alta umidade
CEa (mS m ⁻¹)	0 – 25	Média	5,72	7,89
		Mínimo	3,44	4,79
		Máximo	10,70	12,29
		Desvio Padrão	1,22	1,40
		CV (%)	21,38	17,79

⁽¹⁾Umidade média do solo na área de estudos para leituras de CEa efetuadas em 13/11/2018: 13,7 kg kg⁻¹. ⁽²⁾Leituras realizadas dois dias após chuva de 70 mm.

Os valores médios de RP do solo variaram entre 0,9 (0-10 cm) e 2,10 Mpa (30-40 cm), indicando uma tendência de aumento da RP em função do aumento da profundidade de mensuração (Tabela 2). Resultado esse esperado para o tipo de solo que possui horizonte textural em subsuperfície. Estudos conduzidos por Cortez *et al.*, (2014) e Nagahama *et al.*, (2016), indicam o aumento da RP em profundidade até à camada de 0,25-0,30 m, provavelmente devido a um conjunto de fatores, entre os quais maior deposição de matéria orgânica e atividade biológica nas camadas superficiais que diminui a densidade do solo, além do intenso tráfego máquinas/implementos em área sem revolvimento do solo, que favorece a distribuição de pressões resultantes do contato solo-rodado, contribuindo para formação de

camadas compactadas e para o aumento da RP nas camadas subsuperficiais, corroborando com os resultados observados neste estudo.

Outra causa da compactação do solo são as tensões que surgem na interface solo/pneu e solo/implemento, pela aplicação de cargas dinâmicas ao solo, por rodados e implementos agrícolas durante o manejo (FLOWERS, 1998; SILVA *et al.*, 2003), mesmo em sistema de plantio direto. A compactação se caracteriza pela aglutinação das partículas primárias do solo, mudanças em propriedades físicas relacionadas ao volume de espaço vazio do solo, redução do crescimento e da distribuição de raízes e suas consequências (STONE; GUIMARÃES; MOREIRA, 2002; SILVA *et al.*, 2003; STIRZAKER; PASSIOURA; WILMS, 1996).

Tabela 2 – Resumo estatístico descritivo da resistência do solo à penetração (RP, MPa), mensurada em 17 de novembro de 2018

Profundidade (cm)	Média (Mpa)	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	CV (%)
0-10	0,90	0,30	1,67	0,29	32,20
10-20	1,67	1,05	2,30	0,23	13,72
20-30	1,74	1,08	2,43	0,24	13,75
30-40	2,10	1,39	3,49	0,32	15,17

Na Tabela 3 é apresentado o resultado da análise de correlação de Pearson entre os valores de CEa e RP, para as diferentes condições de umidade do solo. Não foi observada correlação da CEa com a RP, quando o solo apresentou maior umidade, ou seja, dois dias após chuva de 70 mm, independente da profundidade mensurada. Este fato pode indicar que, para detecção indireta de zonas compactadas, a partir da mensuração da CEa do solo, é desejável um baixo teor de água no solo.

Correlação negativa e significativa foi observada para as camadas mais subsuperficiais, estando o solo com menor teor de umidade. Em seus estudos, Freeland (1989) destacou que o principal fator condutor de eletricidade pelo solo é a água presente em seus poros. Portanto, em um solo com menor teor de água espera-se menor condução elétrica, em especial, nas camadas mais densas, onde os espaços de poros são reduzidos. Neste estudo observou-se que a correlação negativa significativa se deu justamente nas camadas de solo mais subsuperficiais, ou seja, aquelas mais compactadas (Tabela 2).

Tabela 3 – Correlação de Pearson entre a condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m⁻¹) mensurada em duas condições de umidade e a resistência do solo à penetração (RP, MPa)

	CEa	CEa	RP	RP	RP	RP
	13/11/2018	17/11/2018	0-10	10-20	20-30	30-40
CEa 13/11/2018	1,00					
CEa 17/11/2018	0,36*	1,00				
RP 0-10	-0,19	-0,01	1,00			
RP 10-20	-0,19	-0,17	0,50*	1,00		
RP 20-30	-0,35*	-0,19	0,12	0,50*	1,00	
RP 30-40	-0,35*	0,08	0,10	0,18	0,62*	1,00

*Coeficiente de Pearson significativo a 5% de probabilidade

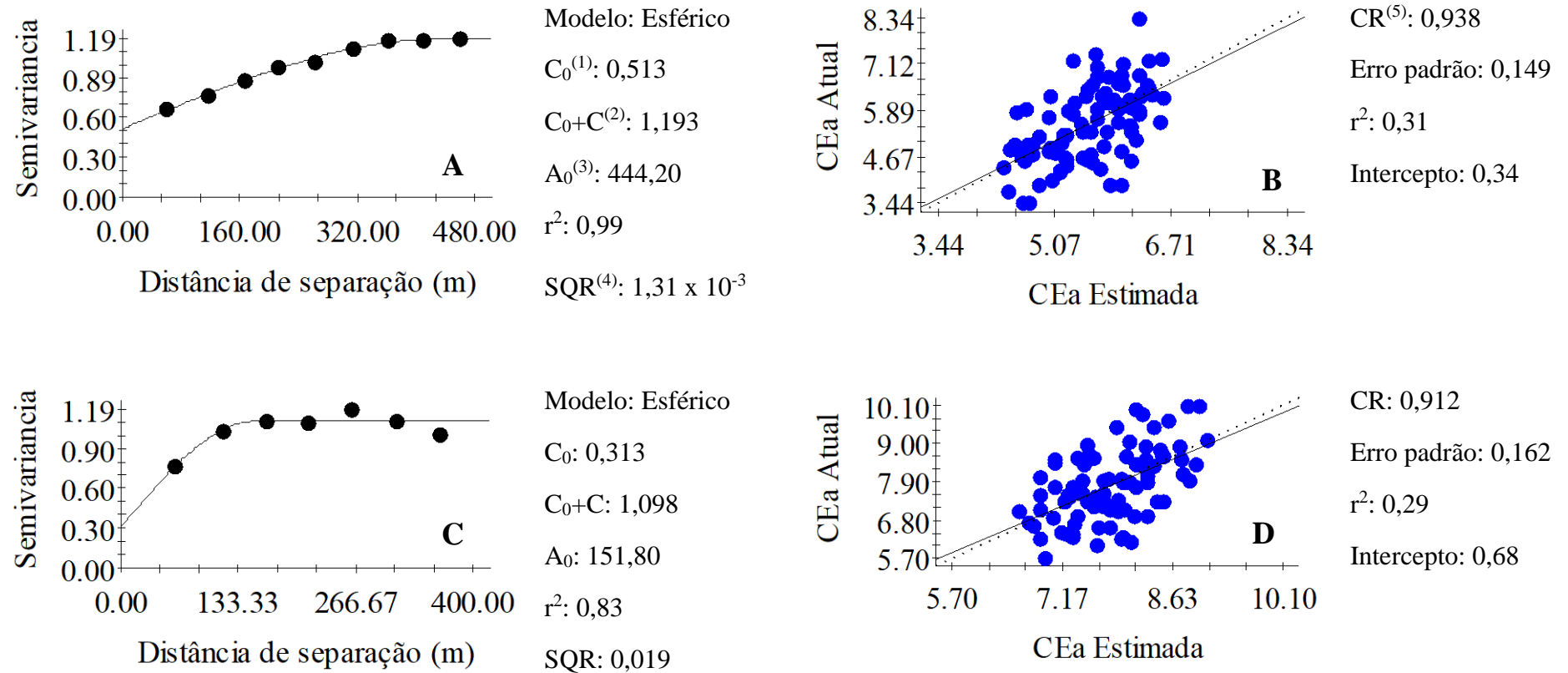
4.2 MODELAGEM DA DEPENDÊNCIA ESPACIAL

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os semivariogramas e os gráficos de validação cruzada, referentes à modelagem da dependência espacial da CEa (para as diferentes datas de leitura) e da RP (para as diferentes camadas de solo). A CEa apresentou dependência espacial para as duas datas de mensuração. O modelo Esférico foi o modelo que melhor se ajustou a semivariância empírica dos dados.

Foi observado dependência espacial para RP nas camadas de 0-10, 20-30 e 30-40 cm, sendo o Modelo Gaussiano ajustado para a primeira camada de solo e o modelo Esférico para as demais. Na camada de 10-20 não houve variabilidade espacial de RP (Fig. 7C), este fato pode ser explicado pela não existência, de fato, da variabilidade ou ainda pela necessidade de uma grade mais densa para detectar tal variabilidade, o que é descartado, haja visto que para as demais camadas a variabilidade foi detectada.

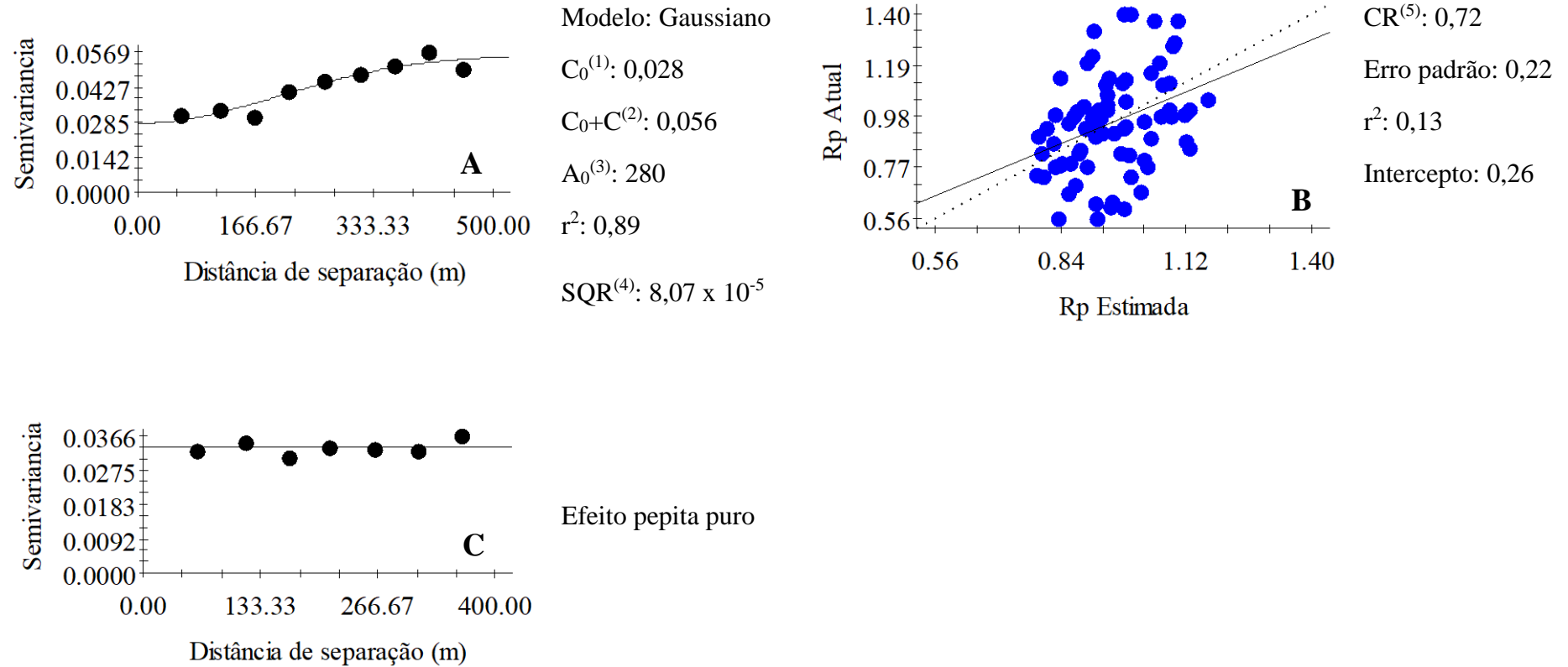
Os maiores alcances foram observados para a condutividade elétrica mensurada em solo com baixo teor de umidade e RP na camada de 0-10 cm. Os valores de alcance podem influenciar na qualidade das estimativas, uma vez que ele determina o número de valores usados na interpolação. Assim, estimativas feitas com interpolação por krigagem ordinária utilizando valores de alcances maiores tendem a ser mais confiáveis, apresentando mapas que representem melhor a realidade (CORÁ *et al.*, 2004).

Figura 6 – Modelos teóricos de semivariância, parâmetros geoestatísticos e gráficos de validação cruzada da modelagem da dependência espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m⁻¹) mensurada em 13/11/2018 (A e B) e em 17/11/2018 (C e D)



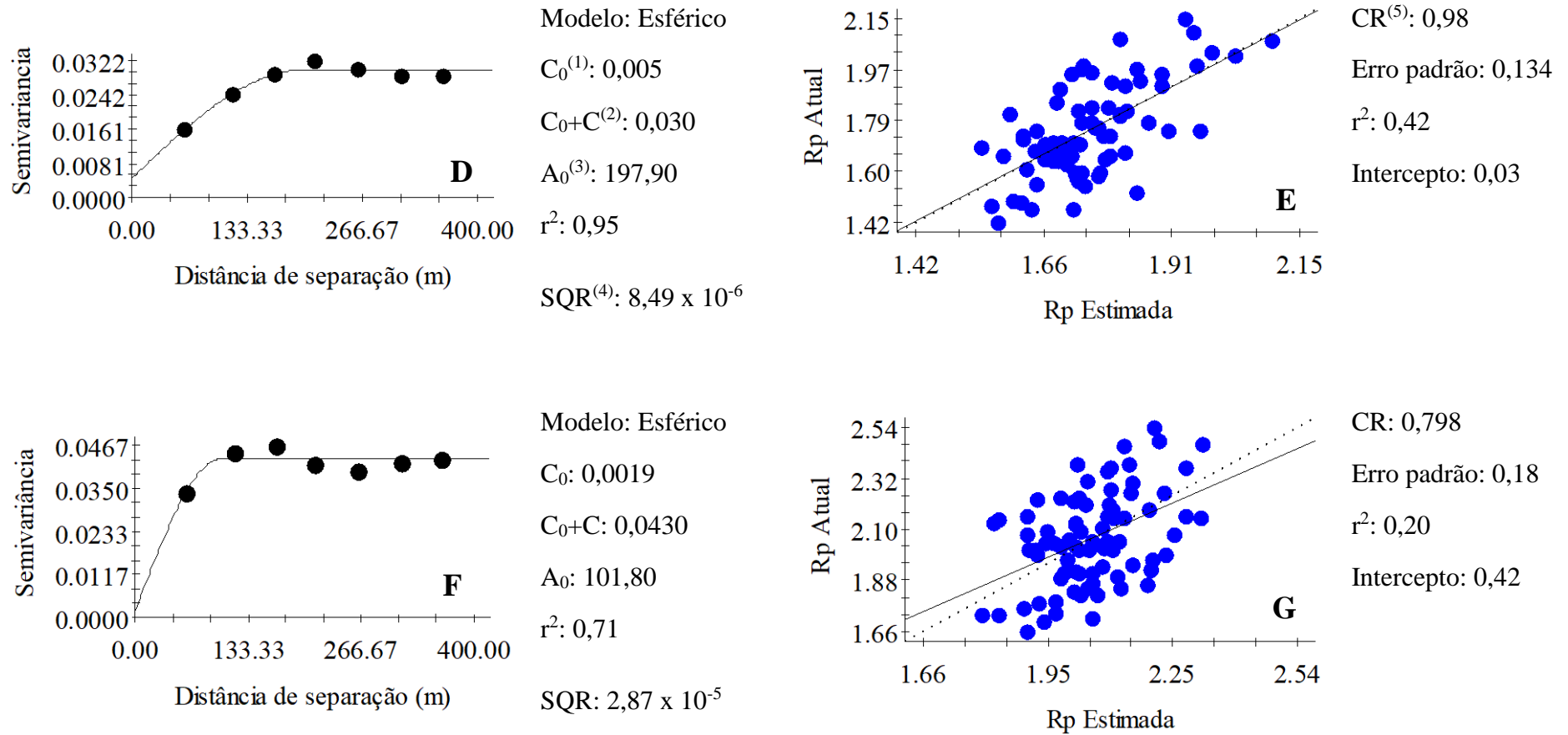
⁽¹⁾Efeito pepita. ⁽²⁾Patamar. ⁽³⁾Alcance (m). ⁽⁴⁾Soma de Quadrados do Resíduo. ⁽⁵⁾Coefficiente de regressão.

Figura 7 – Modelos teóricos de semivariância, parâmetros geoestatísticos e gráficos de validação cruzada da modelagem da dependência espacial da resistência do solo à penetração (RP, MPa) nas profundidades de 0 – 10 cm (A e B) e 10 – 20 cm (C)



⁽¹⁾Efeito pepita. ⁽²⁾Patamar. ⁽³⁾Alcance (m). ⁽⁴⁾Soma de Quadrados do Resíduo. ⁽⁵⁾Coefficiente de regressão.

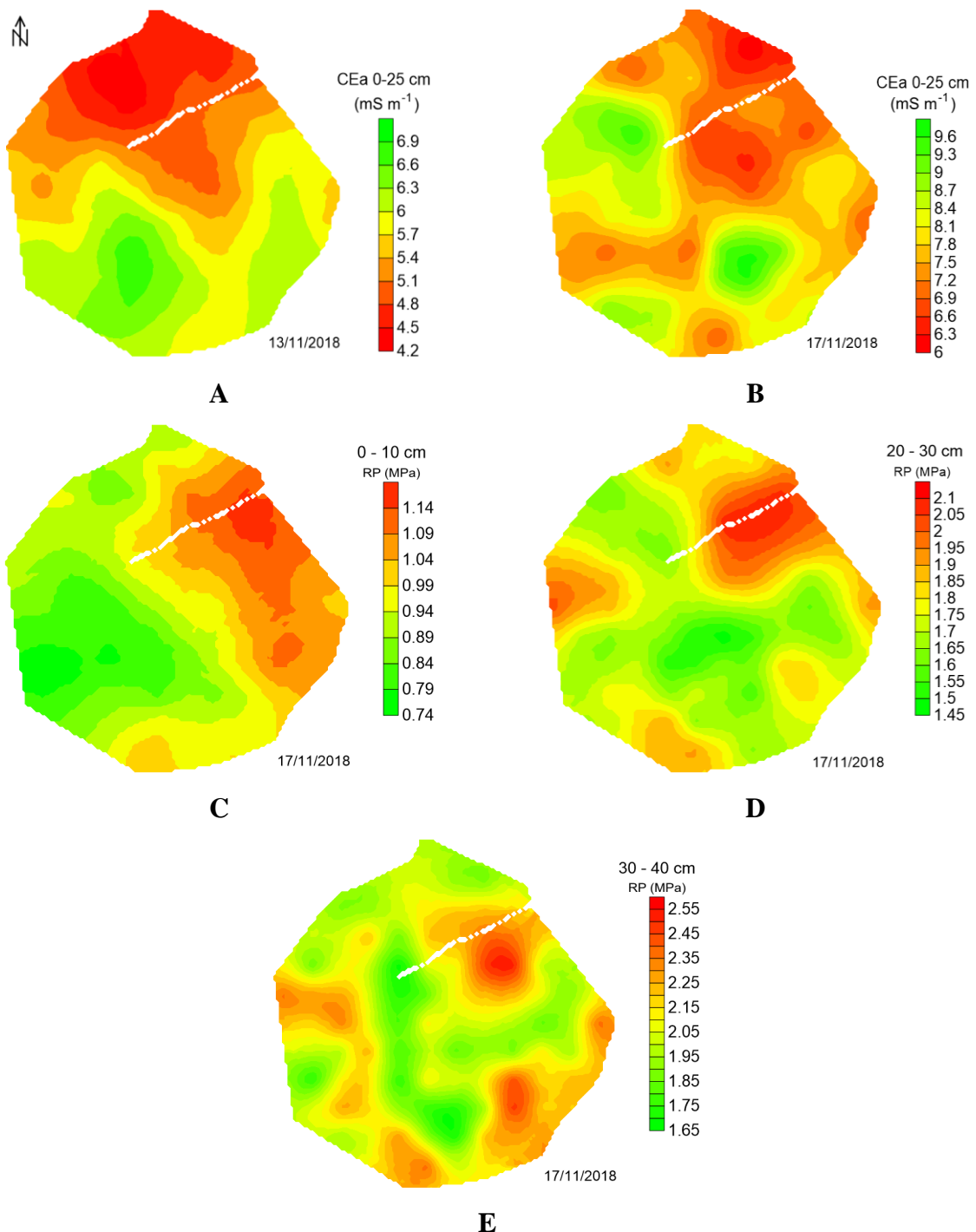
Figura 8 – (Continuação) Modelos teóricos de semivariância, parâmetros geoestatísticos e gráficos de validação cruzada da modelagem da dependência espacial da resistência do solo à penetração (RP, MPa) nas profundidades de 20 – 30 cm (D e E) e 30 – 40 cm (F e G)



⁽¹⁾Efeito pepita. ⁽²⁾Patamar. ⁽³⁾Alcance (m). ⁽⁴⁾Soma de Quadrados do Resíduo. ⁽⁵⁾Coefficiente de regressão.

Os mapas temáticos representativos da variabilidade espacial da CEa e da RP são apresentados na Figura 9. Por análise visual é possível observar maior relação do mapa de CEa medido em 13/11/2018 com os mapas de RP, onde locais de maior CEa correspondem a locais de menor RP, conforme já evidenciado na análise de correlação de Pearson.

Figura 9 – Mapas temáticos representativos da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa; mS m^{-1}) mensurada em 13/11/2018 (A) e em 17/11/2018 (B) e da resistência do solo à penetração (RP, MPa) nas camadas de 0 – 10 cm (C), 20 – 30 cm (D) e 30 – 40 cm (E)



As variações observadas nos mapas de CEa podem ser explicadas pelas variações nos atributos do solo. A CEa se relaciona com a textura, umidade do solo, teor de matéria orgânica, acidez, nível de fertilidade e estado de compactação (CORASSA *et al.*, 2016; PERALTA; COSTA, 2013) e estes fatores relacionam-se entre si. Estudo conduzido por Wagner *et al.* (2018) demonstraram uma relação significativa entre estes atributos do solo, sendo esta relação maior nas camadas superficiais, até 25 cm. Nas camadas superficiais essa relação é negativa e nas camadas subsuperficiais positiva. A relação negativa na camada superficial pode estar associada ao maior teor de matéria orgânica, fertilização, desenvolvimento radicular e atividade biológica nesta camada.

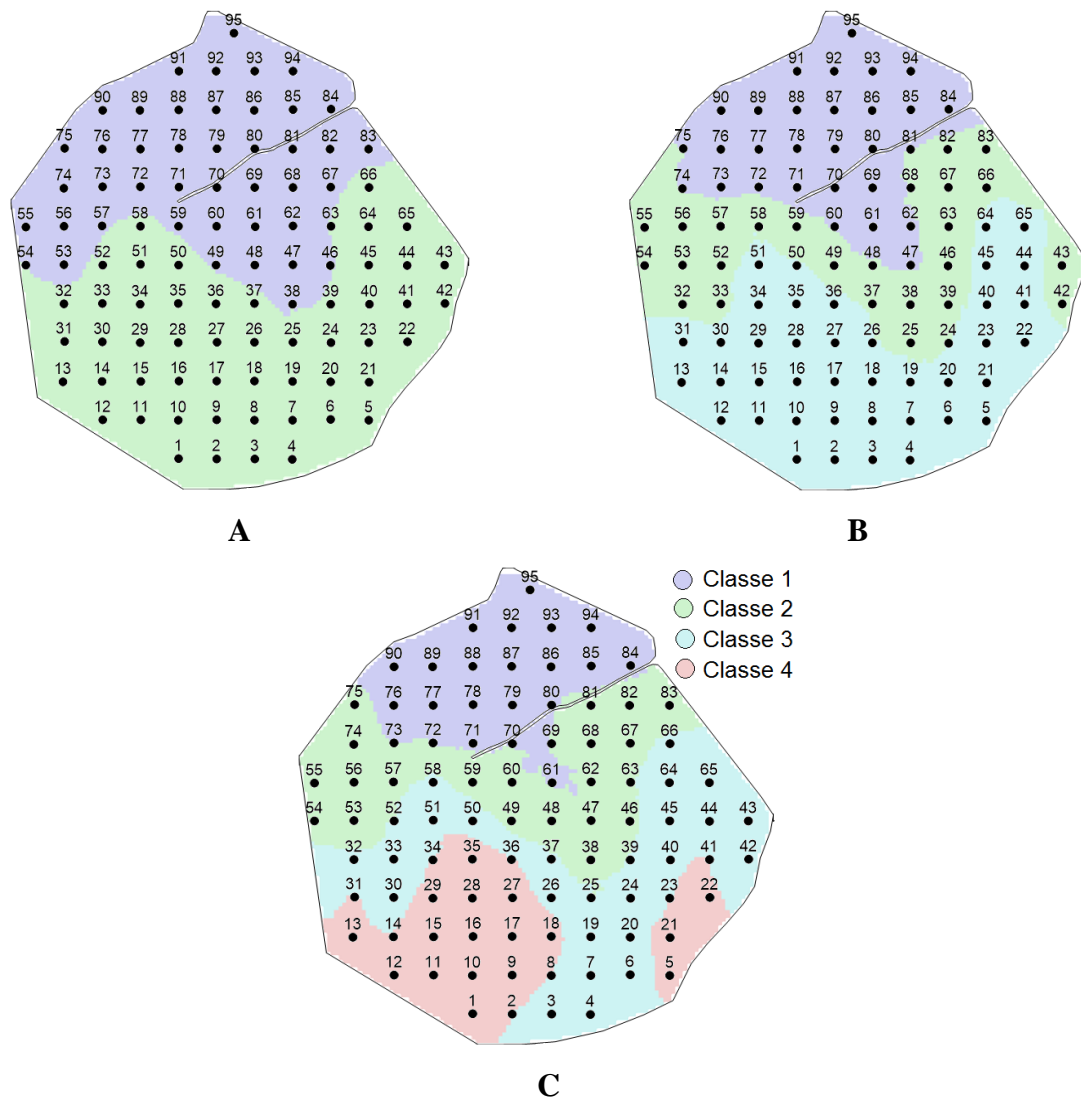
Outro fato evidenciado nos mapas é que a RP, na área de estudo, não é uniforme. De acordo com Richart *et al.*, (2005), a compactação depende de fatores externos como o tipo, a intensidade e a frequência de carga aplicada, bem como de fatores internos do solo, destacando a umidade, textura, estrutura, teor de carbono, densidade inicial e o histórico de tensões aplicadas ao longo dos cultivos. Estes fatores influenciam não apenas a variabilidade espacial da RP, mas também, sua magnitude em função das diferentes camadas de solo estudadas. Conforme discutido anteriormente os valores de RP os valores normalmente utilizados como limitantes são de 2,0 Mpa e alguns trabalhos apontando para 3,5 Mpa, observa-se que para a área em estudo não haveria necessidade de realizar-se nenhuma intervenção mecânica para alterar os valores obtidos. Como medida de contenção e redução do aumento dos valores de RP para essa situação recomenda-se realizar um bom plano de rotações de culturas, com plantas com diferentes sistemas radiculares a fim de explorar diferentes camadas do solo. O uso da ferramenta conhecida como sulcador, por alguns conhecida como “facão ou botinha sulcadora”, no momento da semeadura pode auxiliar muito na redução da RP, proporcionando maior aprofundamento das raízes das culturas. A combinação desses métodos, cultura e mecânico, pode melhorar significativamente as condições físicas do solo e conseqüentemente a produtividade das culturas.

O valor da RP normalmente utilizado como limitante é de 2,0 MPa (LIMA *et al.*, 2012). 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).

4.3 DELIMITAÇÃO DAS ZONAS DE MANEJO E TESTE DE MÉDIAS

Na Figura 10 são apresentados os mapas de zonas de manejo delimitado com base na mensuração de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) efetuada em 13 de novembro de 2018, organizados em 2 classes (A), 3 classes (B) e 4 classes (C). Vale ressaltar que a área não foi dividida em um maior número de classes pois dificultaria o manejo operacional, dado o nível tecnológico dos produtores da região de estudo.

Figura 10 – Mapas de zonas de manejo (ZM) delimitado com base na mensuração de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) efetuada em 13 de novembro de 2018, organizados em 2 classes (A), 3 classes (B) e 4 classes (C).



Na Tabela 4 é apresentado o resultado do teste de Normalidade. Foi observado distribuição não normal para as seguintes situações: RP de 20-30 para classe 2 quando o mapa dividido em duas classes e para a classe 3 quando o mapa dividido em 4 classes. RP de 30-40

cm para classe 1 quando o mapa dividido em duas, três e quatro classes. Dessa forma a RP média destas classes, nestas camadas de solo, não foram comparadas com as demais.

Tabela 4 – Número de pontos amostrais (N), desvio padrão (DP), valor do teste de normalidade de Shapiro-Wilk (W) e significância do teste de normalidade (p-valor) para os valores de resistência à penetração do solo (RP; MPa), nas diferentes camadas estudadas, para cada classe dos mapas de zonas de manejo (ZM) gerados com base na mensuração de condutividade elétrica aparente do solo (CEa, $mS\ m^{-1}$) efetuada em 13 de novembro de 2018

	Classes	N	Média	DP	W	p-valor		Classes	N	Média	DP	W	p-valor
RP 0-10 cm	1	41	0,93	0,31	0,98	0,68	RP 10-20 cm	1	41	1,73	0,24	0,98	0,62
	2	47	0,88	0,28	0,98	0,75		2	47	1,62	0,22	0,96	0,14
	1	25	0,93	0,35	0,98	0,95		1	25	1,69	0,23	0,95	0,31
	2	22	0,96	0,22	0,95	0,37		2	22	1,80	0,21	0,92	0,07
	3	39	0,85	0,29	0,97	0,50		3	39	1,59	0,22	0,97	0,44
	1	17	0,90	0,37	0,96	0,71		1	17	1,66	0,20	0,94	0,27
	2	21	0,90	0,25	0,96	0,47		2	21	1,78	0,22	0,92	0,07
	3	24	0,90	0,24	0,99	0,99		3	24	1,59	0,24	0,93	0,11
	4	18	0,86	0,30	0,96	0,69	4	18	1,65	0,21	0,91	0,10	
	Classes	N	Média	DP	W	p-valor		Classes	N	Média	DP	W	p-valor
RP 20-30 cm	1	41	1,78	0,30	0,99	0,91	RP 30-40 cm	1	41	2,17	0,39	0,91	0,00
	2	47	1,70	0,18	0,90	0,00		2	47	2,04	0,22	0,98	0,72
	1	25	1,76	0,31	0,97	0,68		1	25	2,19	0,41	0,81	0,00
	2	22	1,82	0,29	0,97	0,69		2	22	2,11	0,36	0,99	0,99
	3	39	1,68	0,13	0,97	0,50		3	39	2,03	0,22	0,98	0,78
	1	17	1,82	0,32	0,95	0,54		1	17	2,28	0,47	0,84	0,01
	2	21	1,80	0,28	0,98	0,90		2	21	2,11	0,37	0,99	1,00
	3	24	1,72	0,20	0,84	0,00		3	24	2,07	0,18	0,94	0,19
4	18	1,68	0,14	0,96	0,52	4	18	2,03	0,22	0,94	0,31		

Na Tabela 5 é apresentado o Teste de médias ($p < 0,05$) para os valores de resistência à penetração do solo (RP; MPa), nas diferentes camadas estudadas, para cada classe dos mapas de zonas de manejo (ZM) gerados com base na mensuração de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) efetuada em 13 de novembro de 2018. Foi observado diferença estatística entre os valores médios de RP para as camadas 10-20, 20-30 e 30-40 cm. Para a camada de 10-20 cm, a média de RP apresentou diferença para todas as situações de classes estudadas. Para camada 20-30 cm a média de RP apresentou diferença para a divisão em três classes. Nas camadas de 0-10 e de 30-40 cm a RP não apresentou diferença estatística entre suas médias, independentemente do número de classes ao qual foi dividido o mapa de CEa.

Tabela 5 – Teste de médias ($p < 0,05$) para os valores de resistência à penetração do solo (RP; MPa), nas diferentes camadas estudadas, para cada classe dos mapas de zonas de

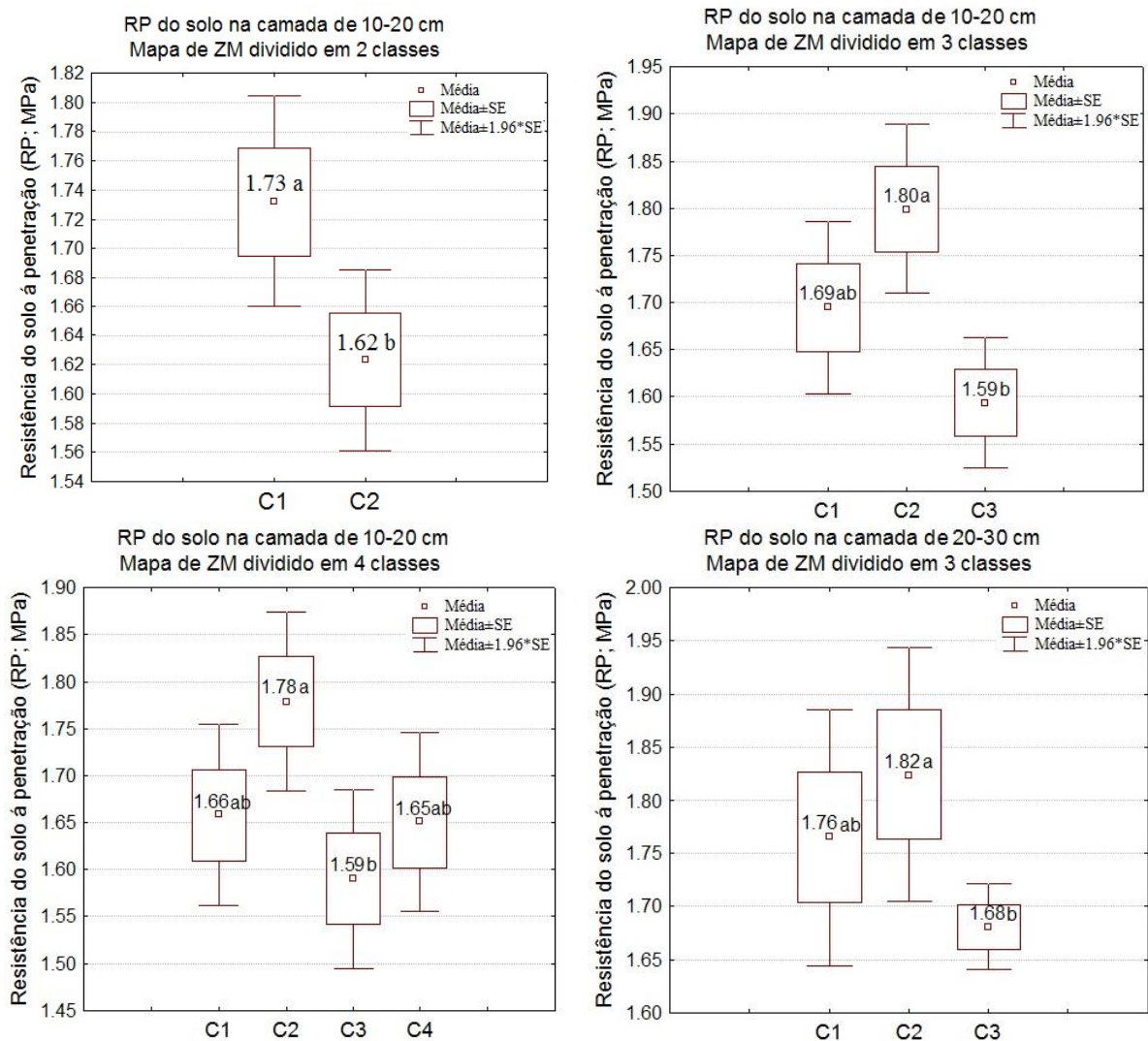
manejo (ZM) gerados com base na mensuração de condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m^{-1}) efetuada em 13 de novembro de 2018

Interações entre Classes	Média G1	Média G2	t-valor	g.l.	p-valor	DP G1	DP G2	F-var	p-var	
RP 0-10 cm	1 x 2	0,93	0,88	0,72	86	0,47	0,31	0,28	1,21	0,52
	1 x 2	0,93	0,96	-0,33	45	0,74	0,35	0,22	2,50	0,04
	1 x 3	0,93	0,85	1,04	62	0,30	0,35	0,29	1,42	0,33
	2 x 3	0,96	0,85	1,57	59	0,12	0,22	0,29	1,76	0,17
	1 x 2	0,90	0,90	0,02	36	0,98	0,37	0,25	2,19	0,10
	1 x 3	0,90	0,90	-0,02	39	0,98	0,37	0,24	2,44	0,05
	1 x 4	0,90	0,86	0,36	33	0,72	0,37	0,30	1,53	0,39
	2 x 3	0,90	0,90	-0,06	43	0,95	0,25	0,24	1,12	0,79
	2 x 4	0,90	0,86	0,44	37	0,66	0,25	0,30	1,43	0,44
	3 x 4	0,90	0,86	0,52	40	0,61	0,24	0,30	1,59	0,29
RP 10-20 cm	1 x 2	1,73	1,62	2,25	86	0,03	0,24	0,22	1,18	0,59
	1 x 2	1,69	1,80	-1,59	45	0,12	0,23	0,21	1,19	0,68
	1 x 3	1,69	1,59	1,76	62	0,08	0,23	0,22	1,13	0,71
	2 x 3	1,80	1,59	3,55	59	0,00	0,21	0,22	1,05	0,92
	1 x 2	1,66	1,78	-1,74	36	0,09	0,20	0,22	1,18	0,74
	1 x 3	1,66	1,59	0,95	39	0,35	0,20	0,24	1,37	0,52
	1 x 4	1,66	1,65	0,11	33	0,92	0,20	0,21	1,03	0,96
	2 x 3	1,78	1,59	2,75	43	0,01	0,22	0,24	1,16	0,74
	2 x 4	1,78	1,65	1,87	37	0,07	0,22	0,21	1,15	0,78
	3 x 4	1,59	1,65	-0,86	40	0,39	0,24	0,21	1,33	0,55
RP 20-30 cm	1 x 2	1,76	1,82	-0,68	45	0,50	0,31	0,29	1,16	0,73
	1 x 3	1,76	1,68	1,52	62	0,13	0,31	0,13	5,77	0,00
	2 x 3	1,82	1,68	2,70	59	0,01	0,29	0,13	4,96	0,00
	1 x 2	1,82	1,80	0,19	36	0,85	0,32	0,28	1,33	0,54
	1 x 4	1,82	1,68	1,58	33	0,12	0,32	0,14	4,90	0,00
RP 30-40 cm	2 x 4	1,80	1,68	1,55	37	0,13	0,28	0,14	3,68	0,01
	2 x 3	2,11	2,03	1,11	59	0,27	0,36	0,22	2,74	0,01
	2 x 3	2,11	2,07	0,41	43	0,68	0,37	0,18	4,07	0,00
	2 x 4	2,11	2,03	0,79	37	0,44	0,37	0,22	2,86	0,03
	3 x 4	2,07	2,03	0,70	40	0,49	0,18	0,22	1,42	0,42

Na Figura 11 são apresentados os Gráficos Box-Plot para valores de resistência à penetração do solo (RP; MPa) que apresentaram diferença estatística significativa pelo teste t ($p < 0,05$) em função do número de classes (C) do mapa de zonas de manejo (ZM) delimitado com base nas leituras de condutividade elétrica aparente do solo efetuadas em 13 de novembro de 2018. O maior valor de RP para a camada de 10-20 cm foi de 1,8 MPa, obtido quando o mapa de CEa foi dividido em três classes. Para a camada 20-30 cm, o maior valor observado foi de 1,82 MPa, obtido quando o mapa de CEa foi dividido também em três classes. A divisão do mapa de CEa em três classes foi sensível para a detecção dos maiores valores de RP, indicando que para uma amostragem de RP, direcionada a partir de mapas de zonas de manejo gerados com base na variabilidade espacial a CEa, a divisão em um menor número de classes

pode não ser suficiente para indicar diferenças na RP do solo, embora os valores tenham apresentado diferença estatística.

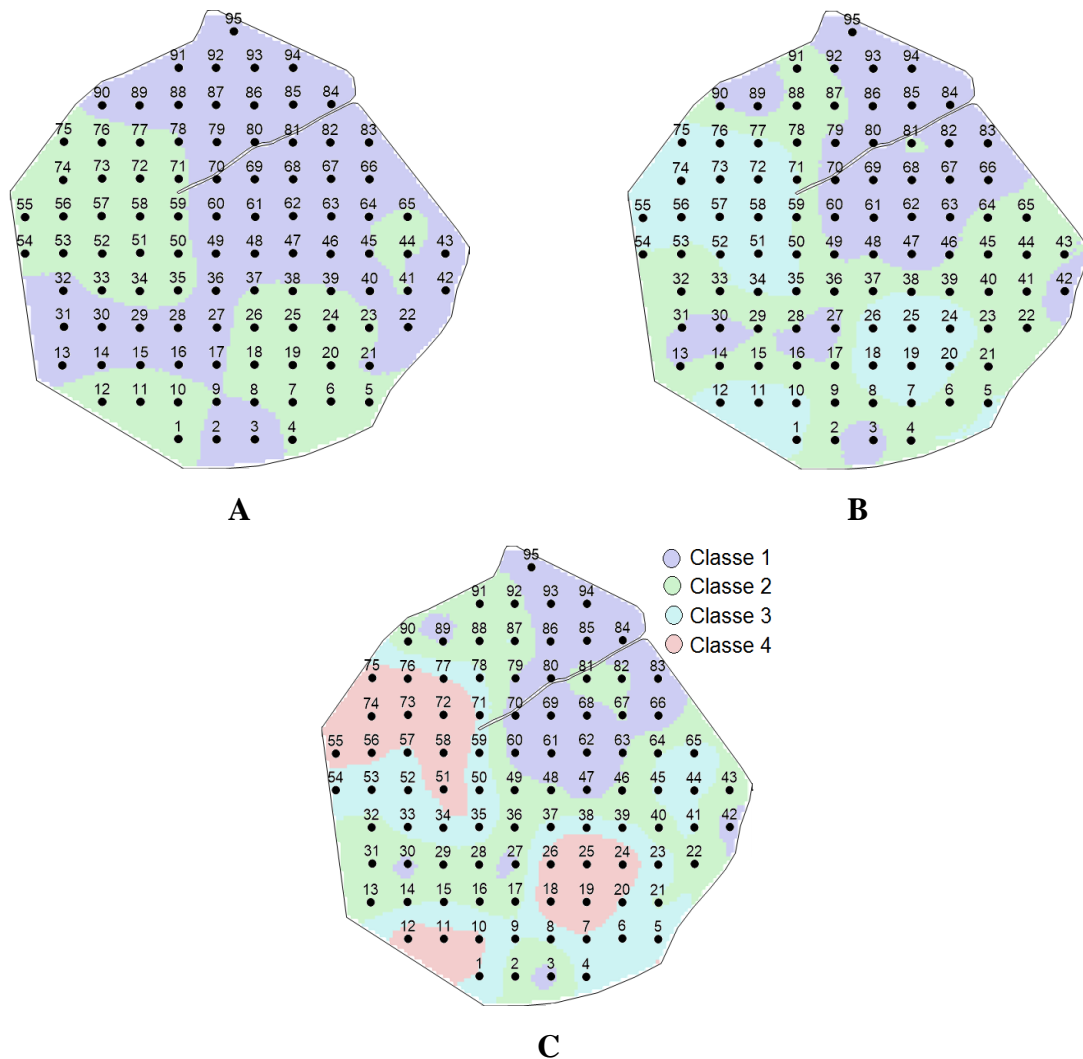
Figura 11 – Gráficos Box-Plot para valores de resistência à penetração do solo (RP; MPa) que apresentaram diferença estatística significativa pelo teste t ($p < 0,05$) em função do número de classes (C) do mapa de zonas de manejo (ZM) delimitado com base nas leituras de condutividade elétrica aparente do solo efetuadas em 13 de novembro de 2018



Os mapas de zonas de manejo gerados a partir das mensurações da CEa em 17/11/2018 apresentam diferenças em relação aos mapas de zonas de manejo gerados a partir da mensuração da CEa em 13/11/2018 em função do maior teor de água no solo. Este fato possivelmente decorreu em função de uma maior participação da fase líquida do solo na condução de corrente elétrica, uma vez que esta fase favorece tal fenômeno.

Na Figura 11 são apresentados os mapas de zonas de manejo delimitado com base na mensuração de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) efetuada em 17 de novembro de 2018, organizados em 2 classes (A), 3 classes (B) e 4 classes (C). Vale ressaltar que a área não foi dividida em um maior número de classes de manejo, pois dificultaria o manejo operacional, dado o nível tecnológico dos produtores da região estudo.

Figura 12 – Mapas de zonas de manejo (ZM) delimitado com base na mensuração de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) efetuada em 17 de novembro de 2018, organizados em 2 classes (A), 3 classes (B) e 4 classes (C)



Na Tabela 6 é apresentado o resultado do teste de Normalidade. Foi observado distribuição não normal para as seguinte situações: RP de 30-40 para classe um quando o mapa dividido em duas classes, para as classes 1 e 2 quando o mapa dividido em 3 classes e para a classe 1 quando o mapa foi dividido em 4 classes. Em função da não normalidade, a RP média destas classes, nestas camadas de solo, não foi testada comparativamente com as demais.

Tabela 6 – Número de pontos amostrais (N), desvio padrão (DP), valor do teste de normalidade de Shapiro-Wilk (W) e significância do teste de normalidade (p-valor) para os valores de resistência à penetração do solo (RP; MPa), nas diferentes camadas estudadas, para cada classe dos mapas de zonas de manejo (ZM) gerados com base na mensuração de condutividade elétrica aparente do solo (CEa,) efetuada em 17 de novembro de 2018

RP 0-10 cm							RP 10-20 cm						
Classes	N	Média	DP	W	p-valor		Classes	N	Média	DP	W	p-valor	
1	48	0,91	0,29	0,98	0,71		1	48	1,69	0,26	0,98	0,71	
2	36	0,90	0,29	0,98	0,65		2	36	1,66	0,20	0,95	0,10	
1	25	0,96	0,30	0,98	0,87		1	25	1,73	0,29	0,99	0,98	
2	27	0,85	0,29	0,96	0,30		2	27	1,62	0,21	0,94	0,11	
3	21	0,88	0,31	0,96	0,47		3	21	1,65	0,23	0,94	0,20	
1	16	1,01	0,32	0,99	1,00		1	16	1,78	0,27	0,96	0,75	
2	18	0,92	0,24	0,95	0,49		2	18	1,75	0,22	0,96	0,62	
3	17	0,89	0,30	0,93	0,20		3	17	1,66	0,18	0,95	0,50	
4	16	0,88	0,35	0,95	0,45		4	16	1,64	0,26	0,92	0,20	
Classes	N	Média	DP	W	p-valor		Classes	N	Média	DP	W	p-valor	
1	48	1,79	0,26	0,98	0,55		1	48	2,16	0,38	0,92	0,00	
2	36	1,72	0,19	0,98	0,87		2	36	2,07	0,23	0,97	0,43	
1	25	1,83	0,31	0,99	0,99		1	25	2,23	0,44	0,91	0,04	
2	27	1,69	0,21	0,93	0,09		2	27	2,05	0,28	0,91	0,02	
3	21	1,72	0,20	0,97	0,81		3	21	2,10	0,21	0,96	0,52	
1	16	1,92	0,34	0,97	0,77		1	16	2,32	0,46	0,85	0,01	
2	18	1,75	0,19	0,93	0,19		2	18	2,06	0,31	0,96	0,63	
3	17	1,66	0,23	0,94	0,36		3	17	2,01	0,23	0,93	0,23	
4	16	1,69	0,19	0,92	0,17		4	16	2,06	0,18	0,92	0,17	

De acordo com os dados observados na Tabela 7 é evidenciado a necessidade de divisão da área em um maior número de zonas de manejo para que seja possível diferenciar os valores de RP. No presente estudo foi observado diferença significativa para os valores médios de RP na camada de 20-30 cm quando a área foi dividida em 4 classes. Este resultado pode ser decorrente do elevado teor de umidade presente no solo no momento das leituras. Em elevada umidade do solo a CEa é favorecida pela via líquida, conforme já demonstrado em estudos conduzidos por Nadler; Frenkel (1980). Além deste fato trabalhos conduzidos por Silva *et al.*, (2002) apresentam de forma clara e objetiva que, alterações na umidade do solo alteram também sua RP.

Tabela 7 – Teste de médias para os valores de resistência à penetração do solo (RP; MPa), nas diferentes camadas estudadas, para cada classe dos mapas de zonas de manejo (ZM) gerados com base na mensuração de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) efetuada em 17 de novembro de 2018

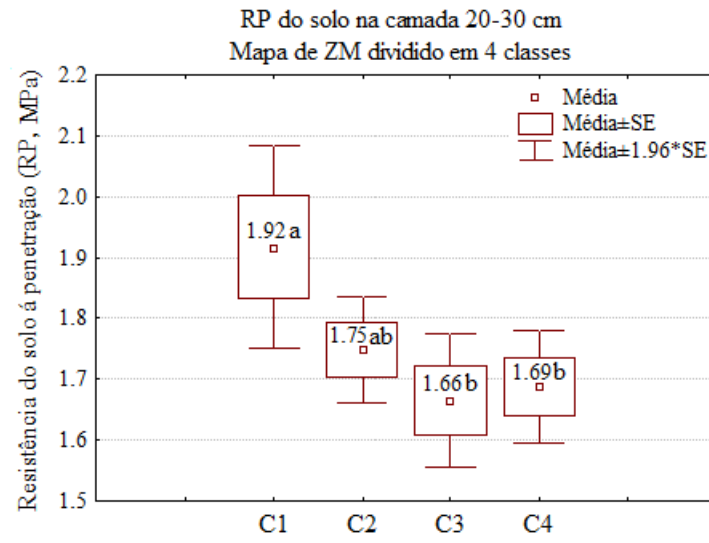
Interações entre Classes	Média G1	Média G2	t-valor	g.l.	p-valor	DP G1	DP G2	F-var	p-var
--------------------------	----------	----------	---------	------	---------	-------	-------	-------	-------

RP 0-10 cm	1 x 2	0,91	0,90	0,14	82	0,89	0,29	0,29	1,02	0,95
	1 x 2	0,96	0,85	1,35	50	0,18	0,30	0,29	1,10	0,80
	1 x 3	0,96	0,88	0,88	44	0,38	0,30	0,31	1,04	0,91
	2 x 3	0,85	0,88	-0,36	46	0,72	0,29	0,31	1,15	0,72
	1 x 2	1,01	0,92	0,95	32	0,35	0,32	0,24	1,74	0,27
	1 x 3	1,01	0,89	1,16	31	0,26	0,32	0,30	1,14	0,80
	1 x 4	1,01	0,88	1,15	30	0,26	0,32	0,35	1,20	0,73
	2 x 3	0,92	0,89	0,36	33	0,72	0,24	0,30	1,53	0,39
	2 x 4	0,92	0,88	0,44	32	0,66	0,24	0,35	2,09	0,15
3 x 4	0,89	0,88	0,11	31	0,92	0,30	0,35	1,37	0,54	
RP 10-20 cm	1 x 2	1,69	1,66	0,59	82	0,56	0,26	0,20	1,71	0,10
	1 x 2	1,73	1,62	1,52	50	0,13	0,29	0,21	1,91	0,11
	1 x 3	1,73	1,65	0,95	44	0,35	0,29	0,23	1,62	0,28
	2 x 3	1,62	1,65	-0,51	46	0,61	0,21	0,23	1,18	0,69
	1 x 2	1,78	1,75	0,35	32	0,73	0,27	0,22	1,53	0,40
	1 x 3	1,78	1,66	1,52	31	0,14	0,27	0,18	2,38	0,10
	1 x 4	1,78	1,64	1,43	30	0,16	0,27	0,26	1,13	0,82
	2 x 3	1,75	1,66	1,35	33	0,19	0,22	0,18	1,56	0,38
	2 x 4	1,75	1,64	1,28	32	0,21	0,22	0,26	1,36	0,54
3 x 4	1,66	1,64	0,17	31	0,86	0,18	0,26	2,11	0,15	
RP 20-30 cm	1 x 2	1,79	1,72	1,46	82	0,15	0,26	0,19	1,98	0,04
	1 x 2	1,83	1,69	1,99	50	0,05	0,31	0,21	2,12	0,06
	1 x 3	1,83	1,72	1,41	44	0,17	0,31	0,20	2,52	0,04
	2 x 3	1,69	1,72	-0,59	46	0,56	0,21	0,20	1,19	0,70
	1 x 2	1,92	1,75	1,84	32	0,08	0,34	0,19	3,27	0,02
	1 x 3	1,92	1,66	2,51	31	0,02	0,34	0,23	2,16	0,14
	1 x 4	1,92	1,69	2,38	30	0,02	0,34	0,19	3,33	0,03
	2 x 3	1,75	1,66	1,16	33	0,25	0,19	0,23	1,51	0,41
	2 x 4	1,75	1,69	0,93	32	0,36	0,19	0,19	1,02	0,98
3 x 4	1,66	1,69	-0,31	31	0,76	0,23	0,19	1,54	0,41	
RP 30-40 cm	2 x 3	2,06	2,01	0,48	33	0,63	0,31	0,23	1,90	0,21
	2 x 4	2,06	2,06	-0,09	32	0,93	0,31	0,18	2,89	0,04
	3 x 4	2,01	2,06	-0,73	31	0,47	0,23	0,18	1,52	0,42

Na Figura 12 é apresentado o gráfico com valores de RP médios da área para cada uma das 4 classes. Foi observado diferença significativa entre a RP da classe 1 (1,92 MPa) com valores médios de RP das classes 3 e 4 (1,66 e 1,69 MPa, respectivamente). Embora tenha sido observado diferença significativa, o maior valor de RP (classe 1), não chega a ser restritivo ao desenvolvimento radicular (LIMA *et al.*, 2012; BETIOLI JUNIOR *et al.*, 2012), indicando assim que nessa situação não há necessidade de fazer nenhuma intervenção mecânica, como uma subsolagem por exemplo.

Figura 13 – Gráfico Box-Plot para valores de resistência à penetração do solo (RP; MPa) que apresentaram diferença estatística significativa pelo teste t ($p < 0,05$) em função do número de classes (C) do mapa de zonas de manejo (ZM) delimitado com base nas

leituras de condutividade elétrica aparente do solo efetuadas em 17 de novembro de 2018



5. CONCLUSÕES

Foi possível diferenciar valores médios de resistência à penetração (RP), que variam entre 0,9 e 2,10 Mpa, a partir da caracterização de classes de manejo geradas com base na variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), que variou de 0,72 a 10,7 mS m⁻¹ no dia 13/011/2018 e de 7,89 a 17,79 mS m⁻¹ no dia 17/011/2018, indicando o potencial desta ferramenta para o direcionamento localizado de amostragens de RP.

Os maiores valores médios de RP foram obtidos para a divisão do mapa de CEa em, no mínimo, três classes.

A maior estratificação de valores de RP foi obtida em função da amostragem direcionada em zonas de manejo confeccionadas a partir da variabilidade espacial da CEa mensurada quando o solo apresentava baixo teor de umidade (13,7 kg kg⁻¹).

Como base na metodologia utilizada identificou-se que para a área do estudo não há necessidade de realizar nenhuma operação de descompactação mecânica em nenhuma das zonas de manejo delimitadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERNARDI, A.C.C., *et al.* *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Alberto Carlos de Campos Bernardi, [et al.], editores técnicos. – Brasília, DF: Embrapa, 2014. 596 p.
- BETIOLI JÚNIOR, E., *et al.* 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. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.7, p.849-856, 2003.
- BEUTLER, A.N., *et al.* Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.6, p.575-580, 2004.
- CENTURION, J.F.; DEMATTÊ, J.L.I. Efeito de sistemas de preparo de solo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivando soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.9, p.263-266, 1985.
- CHIG, L.A.; OLIVEIRA, E.F de; CRESTANI, A.B. Zonas de Manejo da Compactação do Solo. **Uniciências**, v. 18, n. 2, p. 85-90, Dez. 2014.
- CORÁ, J.E., *et al.* Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 06, p. 1013-1021, 2004.
- CORRECHEL, V.; SILVA, A. P. da; TORMENA, C. A; SANCHEZ, A. C. Resistência de um latossolo ao penetrômetro em dois sistemas de preparo de solo. *In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, p. 20, Rio de Janeiro:1997.
- CORTEZ, J.W., *et al.* Avaliação da intensidade de tráfego de tratores em alguns atributos físicos de um Argissolo Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.3, p. 1000-1010. 2014.
- CORWIN, D.L.; LESCH, S.M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 455-471, 2003.
- CUNHA, J.P.A.R.; VIEIRA, L.B.; MAGALHÃES, A. C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.10, p.1-7, 2002.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistemas de Produção, 1**. ISSN 1679-012 Versão Eletrônica - 3ª edição. Nov./2007. Cultivo do Milho. Editor Técnico: José Carlos Cruz. Embrapa Milho e Sorgo. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_sisal/arvore/CONT000fckl80cd02wx5eo0a2ndxy9grdabq.html>
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica. 353p. 2013.

FLOWERS, M.D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic Ochraqualf in Northwest Ohio. **Soil and Tillage Research**, v.48, p.21-35, 1998.

FOLEGATTI, M.V., SILVA, A.P. da.; DE MARIA, I.C. Avaliação da resistência do solo utilizando penetrômetro e penetrógrafo. In: *XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, p.525. Piracicaba: 1990.

FREELAND, R.S. Review of soil moisture sensing using soil electrical conductivity. **Transaction of the ASAE**, v. 32, n.6, p. 2190-2194, 1989.

FU, Q.; WANG, Z.; QIUXIANG, J. Delineating soil nutrient management zones based on fuzzy clustering optimized by PSO. **Mathematical and Computer Modelling**, v.51, p. 1299-1305, 2010.

GAMMA DESIGN SOFTWARE, LLC. **GS+ Geostatistics for the Environmental Sciences**, version 7. 2006.

LARSON, W.E.; ROBERT, P.C. Farming by soil. In: LAL, R.; PIERCE, F. J. (Ed.). **Soil Management for sustainability**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1991. p. 103-112.

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

LIMA, C.L.R., *et al.* 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.

MASSRUHÁ, S.M.F.S.; LEITE, M.A. de A. Agro 4.0 - rumo à agricultura digital. In: MAGNONI JÚNIOR, L.; STEVENS, D.; SILVA, W. T. L. da; VALE, J. M. F. do; PURINI, S. R. de M.; MAGNONI, M. da G. M.; SEBASTIÃO, E.; BRANCO JÚNIOR, G.; ADORNO FILHO, E. F.; FIGUEIREDO, W. dos S.; SEBASTIÃO, I. (Org.). *JC na Escola Ciência, Tecnologia e Sociedade: mobilizar o conhecimento para alimentar o Brasil*. 2. ed. São Paulo: Centro Paula Souza, 2017. p. 28-35.

MILANI, L., *et al.* Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.28, p.591-598, 2006.

MIRANDA, A. C. C.; VERÍSSIMO, A. M.; CEOLIN, A. C. Agricultura de Precisão: Um Mapeamento da Base da Scielo. GESTÃO. Org - **Revista Eletrônica de Gestão Organizacional**, v. 15, n. Ed. Especial, p. 129-137, 2017.

MOLINI, J.P.; MAGALHÃES, R.P.; FAULIN, G.D.C. Análise espacial da ocorrência do índice de cone em área sob semeadura direta e sua relação com fatores do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 2, Jaboticabal May/Aug. 2006.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. ed. 4, 493 p. Rio de Janeiro, editora LTC. 2009.

MORAL, F.J.; TERRÓN, J.M.; SILVA, J.R.M. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil & Tillage Research**, v.106, p. 335–343, 2010.

NADLER, A; FRENKEL, H. Determination of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity measurements by the four electrode method. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, n.5, p. 1216-1221, 1980.

OLIVER, M.A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, v.113, p.56-69, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>

OLIVEIRA, F.A.; FRANCHINI, J.C.; DEBIASI, H. Variabilidade espacial da produtividade da soja e da condutividade elétrica de um Latossolo Bruno. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (Ed.). *Agricultura de precisão: um novo olhar*. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2011. p. 153-156.

PEDROTTI, A., *et al.* Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 4, p. 709-715, Abril 2001.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, n.27, p.30-48, Julho/Dezembro de 2003.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**, v.5, p.49-134, 2007.

RIBON, A.A.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; PEREIRA, G.T. Densidade e resistência à penetração de solos cultivados com siringueira sob diferentes manejos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.25, n.1, p.13-17, 2003.

RICHART, A. *et al.* Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v.26, n.3, p.321-344, 2005.

RODRIGUES JUNIOR, F.A.; VIEIRA, L.B.; QUEIROZ, D.M.; SANTOS, N.T. Geração de zonas de manejo para cafeicultura empregando-se sensor SPAD e análise foliar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.8, p.778–787, 2011.

RODRÍGUEZ-PÉREZ, J.R.; PLANT, R.E.; LAMBERT, J.J.; SMART, D.R. Using apparent soil electrical conductivity (ECa) to characterize vineyard soils of high clay content. **Precision Agriculture**, v.12, p.775–794, 2011.

ROQUE, M.W. *et al.* Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1827-1835, 2008.

ROQUE, M.W. *et al.* Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1827-1835, 2008.

SÁ, M.A.C. de. Considerações teóricas sobre o cálculo da resistência mecânica do solo à penetração determinada com penetrômetros dinâmicos. *Documentos / Embrapa Cerrados – Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 27 p.*

SILVA, R.B., *et al.* O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.973-983, 2003.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II – Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.9-15, 2002.

STATSOFT, Inc. **STATISTICA (data analysis software system)**, version 7. 2004. www.statsoft.com.

STIRZAKER, R.J.; PASSIOURA, J.B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. **Plant Soil**, v.185, n.1, p.151-162, 1996.

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

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.333-339, 1996.

VALENTE, D. S. M. **Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão**. 2010. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.

VIEIRA, S.R. *et al.* Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. **Tópicos em Ciência do Solo**, v.2, p.1-45, 2002.

WAGNER, W., *et al.* Condutividade elétrica e sua relação com a resistência a penetração do solo visando orientar a escarificação mecânica de sítio-específico em lavoura de soja. **Revista Plantio Direto & Tecnologia Agrícola**, ed. 161, p. 14-26, jan-fev. 2018.

ZANÃO JÚNIOR, L.A., *et al.* Variabilidade espacial de atributos químicos em diferentes profundidades em um latossolo em sistema de plantio direto. **Revista Ceres**, v. 57, n.3, p.429-438, 2010.