

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO - PR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – PPGA
MESTRADO

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE, ATRIBUTOS DO SOLO E
VARIABILIDADE ESPACIAL DE PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE MILHO
E FEIJÃO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LEANDRO TAUBINGER

GUARAPUAVA-PR

2016

LEANDRO TAUBINGER

**CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE, ATRIBUTOS DO SOLO E
VARIABILIDADE ESPACIAL DE PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE MILHO
E FEIJÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Mestrado, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Profa. Dra. Aline Marques Genú
Orientadora

Prof. Dr. Cristiano André Pott
Co-Orientador

GUARAPUAVA-PR

2016

Catálogo na Publicação
Biblioteca Unicentro, Campus Cedeteg

T222c Taubinger, Leandro
Condutividade elétrica aparente, atributos do solo e variabilidade espacial de produtividade das culturas de milho e feijão / Leandro Taubinger. -- Guarapuava, 2016.
ix, 66 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, 2016

Orientadora: Aline Marques Genú
Coorientador: Cristiano André Pott
Banca examinadora: Cristiano André Pott, Leandro Rampim, Leandro Maria Gimenez, Aline Marques Genú

Bibliografia

1. Agronomia. 2. Produção vegetal. 3. Agricultura de Precisão. 4. Compactação do Solo. 5. Análise de Fatores. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

CDD 630

Leandro Taubinger

**CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE, ATRIBUTOS DO SOLO E VARIABILIDADE
ESPACIAL DE PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE MILHO E FEIJÃO**

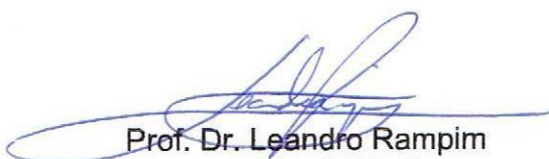
Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 19 de dezembro de 2017.


Prof^ª Dr.^a. Aline Marques Genú
(UNICENTRO)


Prof. Dr. Leandro Maria Gimenez
(ESALQ/USP)


Prof. Dr. Cristiano André Pott
(UNICENTRO)


Prof. Dr. Leandro Rampim
(UNICENTRO)

GUARAPUAVA-PR

2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Aline Marques Genú pela orientação, incentivo, confiança e compreensão nos momentos em que outras atividades tomavam tempo desta importante etapa da minha vida acadêmica.

Agradeço ao professor Cristiano André Pott, pela co-orientação, amizade, apoio e principalmente pelo compartilhamento de seus valiosos conhecimentos.

Agradeço à Unicentro, pela oportunidade de crescimento acadêmico, crescimento pessoal e por proporcionar a convivência com colegas e professores de tamanho apreço.

Agradeço ao amigo Étore Francisco Reynaldo, que na pessoa de Pesquisador da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, me incentivou e apoiou na escolha e realização deste trabalho.

Agradeço à Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, por fomentar esse trabalho e principalmente pela possibilidade de realizar minha formação acadêmica paralelamente enquanto exercia o cargo de pesquisador da mesma.

Agradeço à equipe de Mecanização Agrícola e Inovações Tecnológicas da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, principalmente ao Dionathan de Quadros, Erik Henrique Novak, Sascha Ronny Schwarz, Felipe Salvador, e aos estagiários Vinicius Trombini, Vanderley Matthey e Elói Bareta Junior, pelo apoio nos levantamentos de campo.

Agradeço aos colegas acadêmicos Tayná Jornada Ben, Patricia Juana Colmán Ribelatto e Marcelo Vicenzi pelo apoio nas avaliações de densidade máxima de Proctor.

Agradeço à empresa Aquilino Agricultura de Precisão, em especial à pessoa do amigo Adriano, pela possibilidade de realizar minha formação acadêmica paralelamente enquanto membro dessa valorosa equipe.

Agradeço ao professor Vanderlei Aparecido de Lima pelo ensinamento e pelo apoio na parte da análise estatística multivariada.

Agradeço ao Grupo Karly, pela cessão da área para realização do estudo, e em especial ao Eng. Agrônomo Rodrigo Zimmer pelo apoio e pelas informações prestadas para a realização do trabalho.

Agradeço à minha família, minha mãe Helga, meu pai Adolf e meu irmão Maurício, pelo apoio, incentivo, por serem meu exemplo de vida e de superação, e por terem proporcionado a possibilidade de iniciar, seguir e continuar evoluindo na vida acadêmica.

SUMÁRIO

Lista de Símbolos e Abreviaturas	i
Resumo	iii
Abstract	iv
1. Introdução	1
2. Objetivos	3
3. Referencial Teórico	4
3.1. Condutividade elétrica do solo	5
3.1.1. Propriedades físicas do solo e sua relação com a CEa	7
3.1.2. Propriedades químicas do solo e sua relação com a CEa	9
3.2. Produtividade das culturas	11
3.2.1. Propriedades do solo e a produtividade das culturas	12
4. Materiais e Métodos	16
4.1. Definição da área de estudo	16
4.2. Condutividade Elétrica Aparente (CEa)	18
4.3. Análises Físicas e Químicas do Solo	19
4.3.1. Porosidade do Solo	20
4.3.2. Capacidade de Armazenamento de Água e de Ar do Solo	21
4.3.3. Densidade do Solo e Densidade Relativa	22
4.3.4. Umidade do Solo	23
4.3.5. Granulometria	24
4.3.6. Resistência do Solo à penetração	24
4.3.7 Análises químicas do Solo	25
4.4. Análises estatísticas	26
5. Resultados e Discussão	29
5.1. Definição da área de estudo	29
5.2. Condutividade Elétrica Aparente (CEa)	32
5.3. Definição das camadas de coleta	33
5.4. Determinação do Grau de Compactação Máximo do Solo	34
5.5. Relações entre os atributos investigados	35
5.5.1. Relação entre os atributos do solo, produtividade e CEa na camada de 0 a 15 cm	35
5.5.2. Relação entre os atributos do solo, produtividade e CEa na camada de 15 a 25 cm	39
5.5.3. Relação entre os atributos do solo, produtividade e CEa na camada de 25 a 40 cm	43
6. Conclusões	49
7. Considerações Finais	49
8. Referências Bibliográficas	50
9. Anexos	58

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

<i>P</i>	Fósforo
<i>MO</i>	Matéria Orgânica
<i>V%</i>	Saturação de bases (V%)
<i>H+Al</i>	Hidrogênio + Alumínio
<i>Al</i>	Alumínio
<i>K</i>	Potássio
<i>Ca</i>	Cálcio
<i>Mg</i>	Magnésio
<i>SB</i>	Soma de bases
<i>CTC</i>	Capacidade de troca catiônica
<i>S</i>	Enxofre
<i>CEss</i>	Condutividade elétrica da solução do solo
<i>RP</i>	Resistência à penetração em uma profundidade específica
<i>RPc</i>	Resistência à penetração na camada
<i>RPa</i>	Resistência à penetração na profundidade correspondente à coleta do anel volumétrico
θ_e	Umidade do solo medida com sensor eletrônico
θ_g	Umidade gravimétrica
θ_v	Umidade volumétrica
<i>Ds</i>	Densidade do solo
<i>Dr</i>	Densidade relativa
<i>PT</i>	Porosidade Total
<i>CC</i>	Conteúdo de água retido à capacidade de campo
<i>PDMacro</i>	Porosidade no domínio dos macroporos (> 0,3 mm)
<i>PDMatriz</i>	Porosidade no domínio da matriz do solo
<i>CAMatriz</i>	Capacidade de aeração da matriz do solo
<i>CA_t</i>	Capacidade de aeração total do solo
<i>CC/P_t</i>	Capacidade de armazenamento de água do solo
<i>CA_t/P_t</i>	Capacidade de armazenamento de ar do solo
<i>CE_a</i>	Condutividade Elétrica Aparente
<i>AF</i>	Análise de Fatores
<i>ACP</i>	Análise de Componentes Principais

<i>CV %</i>	Coeficiente de Variação
<i>PRODrn</i>	Produtividade Relativa Normalizada
<i>ha</i>	Hectare

RESUMO

Leandro Taubinger. **Condutividade elétrica aparente, atributos do solo e variabilidade espacial de produtividade das culturas de milho e feijão.**

A Condutividade Elétrica Aparente do solo (CEa) é um método indireto que está sendo utilizado para quantificar a variabilidade espacial do potencial produtivo das lavouras agrícolas e conseqüentemente para recomendar práticas agrônômicas, por ser capaz de identificar a variabilidade de importantes características físicas e químicas do solo, como disponibilidade hídrica, variações na textura, densidade, porosidade e CTC. Assim, este trabalho teve como objetivos identificar os atributos físicos e químicos do solo que tem correlação com a produtividade das culturas, verificar quais desses atributos estão sendo detectados pela CEa assim como verificar se há correlação entre a CEa e o comportamento de produtividade das culturas em Latossolo Bruno. O estudo ocorreu em 2015-2016 em uma lavoura comercial de 51,55 hectares da Fazenda Modelo, município de Cândói, a qual possuía histórico de mapas de produtividade das culturas. A CEa foi obtida através de passadas paralelas a cada 30 m com o equipamento Veris MPS3. Os pontos de coleta de solo foram direcionados em 4 classes de potencial produtivo, denominados de baixo, médio baixo, médio alto e alto. Em cada uma destas classes, a coleta e avaliação dos atributos químicos e físicos se deu em 3 camadas, de 0 a 15, 15 a 25 e 25 a 40 cm de profundidade, determinadas em função da homogeneidade da resistência à penetração levantada previamente na área. Como foram levantadas 39 variáveis, optou-se pelo método estatístico multivariado, aplicando-se a análise de fatores, realizando a extração dos fatores pela análise de componentes principais. Nas três camadas, os atributos responsáveis pela qualidade da estrutura física do solo, como baixa densidade e alta porosidade foram os que mais se relacionaram e beneficiaram a produtividade das culturas. Os mesmos também foram os que mais se relacionaram com a CEa, de modo a limitar a passagem da corrente elétrica e conseqüentemente proporcionar valores menores de condutividade. Nas camadas intermediária e mais profunda, a CTC e a MO também se relacionaram com a produtividade das culturas, de modo a beneficiá-la. A produtividade das culturas e a CEa se relacionaram inversamente.

Palavras-Chave: Agricultura de Precisão, Fertilidade do Solo, Compactação do Solo, Análise de Fatores

ABSTRACT

Leandro Taubinger. **Apparent electrical conductivity, soil attributes and spatial yield variability of maize and bean crops.**

The Apparent Electrical Conductivity (CEa) is an indirect method that is being used to quantify the spatial variability of the productive potential of agricultural crops and consequently to recommend agronomic practices, by be able to identify the variability of important physical and chemical characteristics of the soil such as water availability, variations in texture, density, porosity and cation exchange capacity. This work aimed to identify the physical and chemical soil attributes that has correlation with crop yields, verify which of these attributes are being detected by CEa as well to check for correlation between CEa and crop yield behavior of a Brown Latosol. The study was conducted in 2015-2016 in a commercial field with 51,55 hectares in Modelo Farm, municipality of Candói, which had historical crop yield maps. The CEa was obtained by parallel passes with Veris MPS3 every 30 m. The collection points were directed in 4 productive potential classes, denominated as low, medium low, medium high and high. In each of these classes, the soil collection and evaluation of chemical and physical attributes was made in 3 depths, 0 to 15, 15 to 25 and 25 to 40 cm, determined according to the homogeneity of the penetration resistance previously raised in the area. How were raised 39 variables, we opted for the multivariate statistical method, applying the factor analysis, performing the extraction of the factors by principal component analysis. In the three depths, the attributes responsible for the quality of soil physical structure, such as low density and high porosity, were most related with crop yields, in order to benefit there. The same attributes relate to CEa in order to limit the passage of electrical current and thus provide lower conductivity values. In the intermediate and deeper layers, the CTC and organic matter content were also related to crop productivity in order to benefit it. The crop yields and CEa were inversely related.

Keywords: Precision agriculture, Soil fertility, Soil compaction, Factor analysis

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda pelo aumento na produtividade das culturas e redução do uso de insumos na produção agrícola, cada vez mais produtores tem buscado tecnologias desenvolvidas com a finalidade de entender e manejar a variabilidade espacial nos ambientes de produção, denominando essas técnicas como Agricultura de Precisão. Essa abordagem consiste em substituir as práticas agrícolas espacialmente uniformes nos campos por aquelas realizadas de modo localizado, em função das condições locais dos atributos do solo.

Na agricultura de precisão, a geração de mapas de produtividade e a amostragem de solo têm elevada importância na obtenção de informações sobre a produção. A técnica convencional de amostrar intensamente o solo na forma de grades para obtenção de informação da variabilidade espacial dos componentes físicos e químicos tem sido alvo de críticas pelo seu elevado custo, tornando-se, por vezes, economicamente inviável em sistemas produtivos.

O uso de métodos indiretos que se relacionam com as propriedades do solo e permitam obter informações espacialmente detalhadas desses atributos é fundamental para reduzir o número de amostras coletadas e enviadas para análises laboratoriais assim como, para melhorar o entendimento da variabilidade presente nas áreas.

Um desses métodos indiretos é o levantamento da Condutividade Elétrica Aparente (CEa) do solo, devido à sua capacidade em identificar a variabilidade de importantes características físicas e químicas do solo. Essa CEa vem sendo adotada como método de regionalização de ambientes dentro dos campos de produção que possuem características distintas quanto à disponibilidade hídrica, variações na textura, densidade, porosidade e capacidade de troca catiônica, apresentando conseqüentemente distinta capacidade de prover potencial produtivo.

A CEa do solo está sendo utilizada para quantificar a variabilidade espacial do potencial produtivo das lavouras agrícolas comerciais e conseqüentemente para recomendar práticas agrônômicas. De acordo com o potencial produtivo de cada local da área, é possível realizar a recomendação mais ajustada da quantidade de fertilizantes a ser aplicada em função da quantidade de nutrientes que serão exportados pela cultura e da população ideal em função dos recursos hídricos de cada área.

No entanto, não se tem ainda o detalhamento da participação de cada atributo do solo no comportamento da CEa, nem se a presença de um deles afeta o comportamento de outro. Enquanto alguns desses atributos apresentam correlação direta com a CEa como a CTC, teor

de argila (GRUHN et al., 2012), densidade (SELADJI et al., 2010) e disponibilidade hídrica (GIMENEZ, 2013), outros tem correlação inversa como teores de areia e porosidade (GIMENEZ, 2013) tornando-se um obstáculo no uso da CEa como ferramenta de identificação de locais com diferente potencial produtivo, sendo que os atributos que apresentam correlação direta com CEa, nem sempre apresentam correlação direta com a capacidade de prover potencial produtivo, como a densidade do solo (KRAMER et al., 2013), e os que apresentam correlação inversa com CEa, nem sempre apresentam correlação inversa com a capacidade de prover potencial produtivo, como a porosidade do solo (KRAMER et al., 2013). Caso a CEa esteja apresentando correlação inversa com o potencial produtivo, estará se realizando uma recomendação não somente errônea, mas principalmente inversa da ideal.

Assim, é levantada a hipótese de que a condutividade elétrica aparente (CEa) pode não estar apresentando correlação direta com os fatores associados ao potencial produtivo nas áreas de estudo em que ocorre compactação do solo associada à altos teores de argila, podendo ter interpretação e aplicação errônea na recomendação localizada das práticas agrônômicas no âmbito da Agricultura de Precisão.

2. OBJETIVOS

Identificar os atributos físicos e químicos do solo que tem correlação com a produtividade das culturas

Verificar quais atributos do solo estão relacionados com a Condutividade Elétrica Aparente do solo (CEa).

Verificar se há correlação entre a Condutividade Elétrica Aparente do solo (CEa) e o comportamento de produtividade das culturas.

Verificar se o uso da estatística multivariada, mais especificamente a análise de fatores (AF), é um método adequado para descrever e facilitar o entendimento do comportamento e da variabilidade dos dados.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Embora a presença de variabilidade espacial na produtividade e nos fatores que a condicionam seja reconhecida por produtores e técnicos há muitos anos, apenas duas décadas a separam do surgimento da tecnologia que permitiu manejar esta variabilidade (VITHARANA et al., 2008).

O conhecimento da variabilidade espacial do solo é um aspecto determinante para o aumento da eficiência produtiva, e que pode refletir em melhor rentabilidade (LÜCK et al., 2009).

A filosofia e tecnologia desenvolvidas com a finalidade de entender e manejar a variabilidade espacial nos ambientes de produção, denomina-se Agricultura de Precisão, cujo preceito mais evidente é o de substituir as práticas correntes de tratamentos uniformes nos campos por aqueles realizados de modo variável, em função das condições locais de otimização da produtividade e de redução do impacto ambiental.

A necessidade de caracterização espacial de fatores de planta e de solo tem levado ao surgimento de uma série de propostas e sistemas de sensoriamento e monitoramento. Na tentativa de desenvolver técnicas de medida indireta das propriedades do solo, que permitam obter uma amostragem espacialmente mais detalhada, têm sido estudados sistemas ópticos, eletromagnéticos, eletroquímicos, mecânicos, fluxo de ar e acústicos (ADAMCHUK et al., 2004). O uso desses métodos indiretos é fundamental para reduzir o número de amostras coletadas e enviadas para análises laboratoriais, para melhorar o entendimento da variabilidade presente e para reduzir o custo (RABELLO et al., 2008).

Dentre estes, a condutividade elétrica do solo tem tido destaque, sendo que permite inferir sobre variáveis como textura, salinidade, teor de água, entre outras propriedades físicas e químicas do solo. A condutividade elétrica do solo é obtida através de equipamentos que mensuram a resistividade de modo automatizado e com baixo custo, podendo ser considerada uma ferramenta muito útil para delimitar a variabilidade temporal e espacial (SAMOUËLIAN et al., 2005).

Os mapas de condutividade elétrica do solo reduzem, mas não excluem, a análise de amostras em laboratório. Eles fornecem uma orientação na execução de amostragens estratégicas através da identificação de zonas homogêneas, nas quais é possível reduzir o número de amostras por unidade de área, mantendo a representatividade.

3.1. Condutividade elétrica do solo

A condutividade elétrica é a capacidade que um material possui em conduzir corrente elétrica, e uma das suas utilidades na agricultura provém do fato de que a massa do solo com sua variabilidade na composição físico-química apresenta diferentes níveis de condutividade elétrica (CE).

A condutividade elétrica, expressa em milisiemens por metro (mS m^{-1}), é obtida pelo inverso da resistividade elétrica, que pode ser definida como a propriedade que um material tem de se opor ao fluxo de corrente elétrica, sendo geralmente apresentado em unidades de ohm metro ($\Omega \text{ m}^{-1}$). Assim, tem-se:

$$\sigma = 1/\rho \quad (1)$$

em que,

σ - condutividade elétrica, mS m^{-1} , e

ρ - resistividade elétrica, $\Omega \text{ m}^{-1}$.

Os primeiros relatos sobre estudos com CE são relacionados à salinidade dos solos, na década de 1970, no “USDA-ARS Salinity Laboratory”, em Riverside-CA, EUA (CORWIN & LESCH, 2005). O teor de água e as propriedades físicas e químicas, em especial a salinidade, podem ser citados como fatores de maior influência, sendo que as mudanças de temperatura também influenciam na CE (RHOADES, 1993).

A condutividade elétrica é uma propriedade específica de cada substância. O solo é um meio composto por diversos materiais, cada um possuindo condutividade própria. Rhoades & Corwin (1990) apresentam um modelo de condutividade elétrica que descreve a condutância através de três vias atuando em paralelo: (i) condutância através de camadas alternantes de partículas do solo e entre os limites de suas soluções, (ii) condutância através de soluções do solo contínuas, e (iii) condutância através ou entre superfícies de partículas do solo em contato direto entre elas. Estes três componentes contribuem para a condutividade global do solo, que é denominada condutividade elétrica aparente do solo (CEa), integrando as participações dos componentes.

Para mensurar a CEa, geralmente são utilizados o sistema de indução eletromagnética e o de contato direto (RHOADES & CORWIN, 1984). O método por indução eletromagnética consiste basicamente em um eletrodo de transmissão que é suspenso próximo à superfície do solo, o qual é energizado com corrente alternada em frequência de áudio. Isso estabelece um

campo magnético que induz corrente elétrica no solo gerando um segundo campo magnético a uma distância específica do eletrodo transmissor. O eletrodo receptor gera uma corrente alternada em resposta e proporcional àquela gerada pelo eletrodo transmissor, modificada pela condutividade elétrica do solo. Isso pode ser usado para obter uma leitura da condutividade aparente do solo que é linearmente proporcional à razão dos dois campos magnéticos (KING et al., 2001). Esse método não tem contato com o solo e pode ser preferido se na área pesquisada o revolvimento do solo não é desejável por algum motivo.

O sistema por contato direto penetra no solo, geralmente utilizando como eletrodos de fluxo de corrente elétrica, pelo menos quatro discos de corte lisos, em contato direto com o solo. Dois eletrodos injetam uma corrente no solo e os outros dois medem a voltagem resultante (LUND et al., 2000).

Um modelo de equipamento (Veris®, Veris Thecnologies, Salina, KS, EUA) utiliza um par de eletrodos, ligado a discos de corte, transmitindo uma corrente elétrica no solo, enquanto que os outros dois pares de eletrodos medem a diferença de potencial que ocorre no campo eletromagnético gerado no solo, devido à corrente elétrica aplicada. Os eletrodos necessitam penetrar no solo somente alguns centímetros. Os eletrodos de medição são configurados para medir essa diferença de potencial, simultaneamente, até a profundidade de 0,3 m e 0,9 m, sendo a profundidade de leitura proporcional e função do espaçamento entre os eletrodos. O sistema registra a condutividade medida e a georreferencia utilizando um receptor de GPS. Quando utilizado com espaçamento entre as passadas de 15 a 20 m e velocidade de 12 km h⁻¹, o sistema produz entre 40 e 100 amostras por hectare (CHRISTY & LUND, 1998).

Em um estudo em escala que contemplou vários estados do meio-oeste americano, Sudduth et al. (2005) avaliaram as relações entre a CEa medida por indução e por contato, e suas relações com fatores do solo, observando boas correlações entre as duas formas de medição e da CEa com textura e CTC dos solos.

No entanto, o fato dos equipamentos por contato direto serem de construção robusta, livre de interferências por metal, e não necessitarem da calibração diária, fez com que o uso desse método fosse difundido na agricultura (HARTSOCK et al., 2000).

Corwin & Lesch (2005) apresentam uma síntese de aplicações onde a CEa tem sido utilizada como um indicador no monitoramento de características do solo como salinidade, textura e estratificação, umidade, densidade, matéria orgânica e derivados, CTC, lixiviação, partição de doses de herbicidas, definição de bordas em classificação de solos, classes de drenagem, recarga de lençol freático, entre outras.

Embora não permita obter de modo eficiente indicações sobre os teores de nutrientes presentes (HEINIGER; MCBRIDE; CLAY, 2003), vem sendo adotada como método de regionalização de ambientes dentro dos campos de produção que possuem características distintas quanto à disponibilidade hídrica (BESSON et al., 2010), acidez e nutrientes (LUKAS; NEUDERT; KREN, 2009; HEINIGER; MCBRIDE; CLAY, 2003), carbono (WERBAN et al., 2009) e principalmente variações na textura (OGURI et al., 2009).

No entanto, não se tem ainda o detalhamento da participação de cada um desses atributos no comportamento da CEa, nem se a presença de um deles afeta o comportamento de outro, quanto à CEa obtida.

Friedman (2005) afirma que para o entendimento da CEa é necessário definir os vários componentes do solo e seu efeito. Os fatores podem ser agrupados em três categorias. Na primeira estão aqueles que descrevem o meio, em função das participações volumétricas das porções sólida, líquida e gasosa e da maneira como estão arrançadas, ou seja, sua porosidade, conteúdo de água e estrutura. A segunda categoria é composta por fatores que caracterizam a fração sólida, ou seja, forma, orientação e distribuição do tamanho das partículas, capacidade de troca de cátions e afinidade pela água. Na terceira categoria estão os fatores relacionados às características da solução do solo, como a força iônica, composição catiônica e temperatura.

Dessas propriedades do solo, pode se classificar como propriedades físicas a granulometria, disponibilidade hídrica, densidade, resistência à penetração, porosidade e infiltração do solo. Já entre as propriedades químicas temos a condutividade elétrica da solução do solo, a matéria orgânica, a capacidade de troca de cátions, o pH do solo, além dos teores dos nutrientes em si.

3.1.1. Propriedades físicas do solo e sua relação com a CEa

Segundo Lund et al. (1998), uma das utilidades da CEa advém do fato de que a areia tem baixa condutividade e a argila tem alta condutividade. O ar do solo pode ser considerado um isolante. Sendo assim, solos com maior teor de argila, conseqüentemente com menor quantidade de espaços porosos, facilitam a passagem da corrente elétrica, ao passo que aqueles onde predomina a textura arenosa irão proporcionar maior resistividade. Além disso, as partículas de areia são geralmente constituídas por quartzo, considerado um isolante elétrico.

Lukas, Neudert e Kren (2009) encontraram forte correlação entre as leituras de

condutividade e os teores de argila e areia utilizando um equipamento cujo princípio é a indução eletromagnética. Foi encontrada estabilidade entre leituras feitas em diferentes anos. Os autores identificaram que a condutividade elétrica é uma ferramenta interessante para delimitação de regiões com solos distintos e dessa forma permite realizar a amostragem dirigida do solo.

Becegato (2005) trabalhando em dois talhões na região noroeste do Paraná, concluiu que o método da resistividade elétrica é uma importante ferramenta para auxiliar no mapeamento de solos, principalmente em áreas onde ocorrem variações na textura, teores de argila e areia.

Já Seladji et al. (2010) demonstraram que a resistividade elétrica é sensível à alteração da densidade do solo independentemente da sua composição granulométrica, podendo ser este efeito caracterizado quando a umidade gravimétrica é inferior a $0,25 \text{ kg kg}^{-1}$.

Molin e Faulin (2013) utilizaram o equipamento comercial Veris 3000, que emprega o princípio resistivo, para mensurar a condutividade elétrica do solo, em duas áreas sob cultivo de grãos em semeadura direta, que apresentavam características distintas em termos de solos. Foram realizadas medições em dois momentos para cada área. Em uma primeira área, caracterizada pela presença de variabilidade na textura, os autores identificaram estreita relação entre a participação da argila na granulometria e condutividade elétrica do solo. O mesmo não ocorreu na área onde a variabilidade granulométrica era menor. Os autores reforçam a relação positiva existente entre os teores de argila e água no solo e a ambiguidade na definição de qual fator tem influência predominante sobre a condutividade elétrica do solo.

Khan et al. (2012), trabalhando durante dois anos com mensurador de CEa por indução eletromagnética, encontraram alta correlação desta com teores de argila e umidade. Seladji et al. (2010) também demonstraram que a resistividade elétrica do solo é reduzida com o aumento da saturação relativa por água.

A umidade do solo e a condutividade elétrica da solução, que possuem expressivo impacto sobre a CEa são transientes e inter-relacionadas. Ao perder água por evaporação a concentração de sais se eleva e aumenta a condutividade da solução. Simultaneamente, o volume dos poros ocupados pela solução se reduz e com isso a condução elétrica é também reduzida. Dado que há menor continuidade do condutor eletrolítico e simultâneo aumento do comprimento de percurso da corrente que passa a ocorrer em menor escala pelos poros e em maior escala pelos filmes de água adsorvidos às partículas, a condutividade se reduz de modo expressivo, e de modo severo na medida em que os filmes de

água passam a se desconectar, em baixos níveis de umidade (ALLRED et al., 2008; CORWIN; LESCH, 2005).

A densidade dos solos varia nos solos arenosos entre 1,3 e 1,8 g cm⁻³, nos argilosos de 0,9 a 1,6 g cm⁻³ e nos orgânicos é menor, entre 0,2 e 0,6 g cm⁻³ (MARCOLIN, 2006). É uma propriedade física que está relacionada com a sua estrutura, porosidade e taxa de infiltração de água, levando em consideração a textura deste solo (ALVES et al., 2007). Quando a variação da densidade é causada isoladamente pela variação de classes granulométricas, ela apresenta relação inversa com a CEa, sendo que maiores densidades são oriundas de solos mais arenosos, com alta resistividade elétrica. Mas quando as classes granulométricas apresentam homogeneidade na área, a densidade apresenta relação direta com a CEa, sendo que maiores densidades são oriundas da compactação ou adensamento, causando uma diminuição dos espaços porosos, e conseqüentemente da resistividade.

A resistência à penetração (RP) está diretamente relacionada com a densidade do solo e inversamente à umidade do mesmo. Assim, a RP tende a apresentar relação positiva com a CEa, caso esteja relacionada ao aumento da densidade do solo em função da compactação do mesmo. Caso não exista variação da densidade do solo na área, a RP apresentará relação inversa com a CEa, sendo que umidade e CEa apresentam relação direta.

Segundo Gimenes (2013), a CEa é influenciada por diversas propriedades dos solos e em diferentes intensidades na medida em que a umidade oscila. Dentre as propriedades por ele avaliadas, aquelas relacionadas ao espaço poroso apresentaram maior influência, com destaque para o comportamento oposto entre a micro e macroporosidade, sendo que os espaços porosos apresentam alta resistividade elétrica quando preenchidos por ar, e baixa resistividade elétrica quando preenchidos por água.

3.1.2. Propriedades químicas do solo e sua relação com a CEa

A fase líquida, ou solução do solo, pode ser considerada uma solução eletrolítica, ou seja, possui diversos íons que se dissociam servindo como carreadores de carga para a passagem da corrente elétrica (FUKUE et al., 1999; ALLRED et al., 2008).

Khan et al. (2012), trabalhando durante dois anos com mensurador de CEa por indução eletromagnética, encontraram alta correlação desta com propriedades químicas do solo (matéria orgânica e CE da solução do solo).

Lukas, Neudert e Kren (2009) encontraram correlação positiva da CEa com pH, Mg, Ca e húmus, e correlação negativa da CEa com P e K. Provavelmente, a CEa não detecta

diretamente o teor de nutrientes no solo. É possível que a CEa responda à algumas propriedades físico-químicas do solo que estão diretamente relacionadas com o teor de nutrientes e pH. Isso não significa que, nessas condições, não seja possível a utilização de mapeamento de CEa para estimar o teor dos nutrientes no solo. Para uma melhor interpretação, seria necessário fazer uma outra investigação sobre a umidade do solo, salinidade do solo e CTC.

Werban et al. (2009) chegaram à conclusões bastante parecidas. Os resultados indicaram que a textura, salinidade, ou umidade do solo podem ter mascarado a resposta da CEa à alteração dos níveis de nutrientes no solo. A capacidade da CEa em mensurar os níveis de nutrientes, reside na sua capacidade de identificar pequenas alterações na textura do solo, CTC, ou matéria orgânica, que por sua vez, estão relacionados com as diferenças nos níveis de nutrientes.

As interações complexas entre os componentes da condução de corrente elétrica pelo solo levam à ocorrência de baixas correlações entre a CEa do solo e um fator específico ou mesmo efeitos inversos aos esperados. Este tipo de resultado demonstra que há outros fatores, atuando individualmente ou de forma conjugada, que apresentam maior impacto sobre a CEa que aquele em estudo (ALLRED et al., 2008)

Mudanças na temperatura também influenciam a condutividade elétrica do solo e a condutividade da solução de uma maneira parecida (MCNEIL, 1986). Ocorre um aumento de aproximadamente 2% na condutividade para cada grau de aumento na temperatura. Já Brevik & Fenton (2000) afirmam que a temperatura do solo tem influências desprezíveis sobre os valores de leituras dos equipamentos de CEa se todas forem feitas em um mesmo campo sob condições semelhantes no decorrer de um mesmo dia.

Em relação à profundidade de mensuração, Khan et al. (2012), trabalhando durante dois anos com mensurador de CEa por indução eletromagnética, encontraram que o comportamento da CEa varia de acordo com a profundidade. Quanto mais profunda a camada, mais correlação dos atributos físicos com a CEa.

Besson et al. (2004) utilizaram a resistividade para identificar camadas de solo com densidades distintas e consideraram o método como uma boa alternativa para o estudo quantitativo de camadas de solo mobilizadas. A redução da resistividade ao longo do perfil do solo coincidiu com a elevação da densidade, na parte inferior da camada mobilizada, porém como a participação da argila no solo também aumentou, os efeitos se confundiram.

3.2. Produtividade das culturas

O mapeamento de produtividade, proporcionado pelas ferramentas da agricultura de precisão (AP), destaca-se como alternativa moderna para gerenciar a variabilidade espacial e temporal de lavouras comerciais, orientando práticas de manejo (MOLIN, 1997; MILANI et al., 2006). Desta maneira, mapas de produtividade podem ser utilizados na investigação das causas da variabilidade, e podem ser um recurso eficaz nas decisões sobre o manejo do solo (MOLIN, 1997; MANTOVANI, 2006).

Tal aplicação, no entanto, requer acompanhamento e análise de mapas de produtividade, considerando um histórico de várias safras e de diferentes culturas para que sejam contempladas as variabilidades temporal e espacial (BLACKMORE, GODWIN, FOUNTAS; 2003). Assim, a caracterização da variabilidade na produtividade deve ser feita mediante a investigação de pelo menos três anos de mapeamento (MANTOVANI, 2006; SANTI, 2007).

No Brasil, ainda são escassas as áreas que possuem um conjunto de mapas de produtividade que permitam esta análise temporal. A coleta de dados de produtividade por colhedora deve ser acompanhada de cuidados operacionais, uma vez que fatores como a largura efetiva de corte da plataforma, entrada e saída da lavoura, número de manobras e a limpeza do sensor de produtividade estão entre os mais importantes para a obtenção de dados confiáveis.

Quando o mapeamento de produtividade comercial começou no início de 1990, esperava-se que partes de uma lavoura comercial sempre fossem produzir satisfatoriamente, enquanto outras partes iriam produzir menos. Isto foi devido à suposição de que as características permanentes do solo sempre se comportariam da mesma maneira em cada ano. No entanto, Rodrigues et al. (2012) sugerem que a interferência climática de maneira a reduzir a frequência de precipitação em períodos críticos durante a estação de crescimento provoca um impacto na variação espacial da produtividade do milho.

Amado et al. (2007) investigando um conjunto de seis mapas de soja, milho e trigo, durante cinco anos, em uma área comercial manejada sob sistema plantio direto consolidado no Rio Grande do Sul, obtiveram os seguintes resultados sobre a variabilidade espacial e temporal da produtividade. As produtividades de soja, milho e trigo geralmente estão correlacionadas entre si nas diferentes safras e em anos com ocorrência de déficit hídrico, há aumento da variabilidade espacial da produtividade. As zonas classificadas como de baixo potencial produtivo apresentaram os maiores decréscimos relativos de produtividade da soja.

A produtividade da cultura da soja apresenta dependência espacial classificada como moderada e, em anos com precipitação normal, restrita capacidade de discriminar a variabilidade espacial existente na lavoura. A produtividade da cultura do milho apresenta dependência espacial classificada como forte e é mais eficiente na descrição da variabilidade espacial existente na lavoura.

Basso et al. (2012), trabalhando com mapas de produtividade de trigo ao longo de 5 anos consecutivos, concluíram que a variabilidade espacial de atributos do solo e a distribuição das chuvas afetam tanto a variabilidade espacial como a temporal da produtividade de grãos. A análise espacial e temporal dos mapas de produtividade permitiram a identificação de três zonas espacial e temporalmente estáveis e uma zona instável.

Blackmore, Godwin e Fountas (2003) trabalhando com análise quantitativa dos dados de produtividade de quatro campos comerciais em seis anos, identificaram algumas tendências espaciais e temporais. A variabilidade dentro do ano pode ter o maior impacto no produtividade global. A variabilidade espacial dentro de cada ano foi significativa. O mapa de tendência temporal e espacial pode ajudar a identificar zonas de gestão homogêneas.

Vários pesquisadores desenvolveram métodos para analisar as tendências da variabilidade espacial da produtividade ao longo do tempo. Larscheid e Blackmore (1996) desenvolveram uma técnica para normalizar dados de produtividade de sucessivos anos e produzir mapas de tendência. Lark e Stafford (1996) desenvolveram uma técnica de agrupamento difuso (fuzzy clustering) que identificou áreas homogêneas do campo sem o auxílio de nenhuma base agrônômica. Panneton et al. (2001) e Panneton e Brouillard (2002) utilizaram uma técnica semelhante para identificar onde as produtividades eram estáveis no tempo e instáveis no tempo. Fraisse et al. (1999) foi mais longe ao incluir características topográficas e condutividade elétrica do solo em sua análise.

3.2.1 Propriedades do solo e a produtividade das culturas

Em uma mesma lavoura é possível encontrar subáreas com diferentes níveis de qualidade e, portanto, com diferentes potenciais produtivos, embora as práticas de manejo adotadas tenham sido aplicadas uniformemente (AMADO et al., 2005).

Devido à interrelação da estrutura do solo com fatores como disponibilidade de nutrientes, aeração e fornecimento de água, a mesma está diretamente relacionada à produtividade das culturas (FERNANDES et al., 2007).

A qualidade de um solo para o desenvolvimento das plantas está diretamente

relacionada às suas propriedades físicas, tendo como indicadores características como densidade, porosidade, disponibilidade de água (BONO, 2007) e resistência do solo à penetração, todas características afetadas pelos distintos sistemas de uso e manejo (ARAUJO et al., 2004).

Sistemas de manejo como o Plantio Direto, que não ocasionam revolvimento do solo, aumentam conseqüentemente o teor de matéria orgânica, com resíduos culturais na superfície, diminuindo a erodibilidade (FERNANDES et al., 2007), aliados a rotação de culturas, nas últimas décadas vem contribuindo para o aumento de produtividade, porém o intenso tráfego do maquinário agrícola, juntamente com o não revolvimento do solo, pode trazer prejuízos ao desenvolvimento das plantas, devido à compactação subsuperficial (KRAMER et al., 2013).

Um fator que afere características distintas ao solo é a densidade do solo. Ao comparar diferentes classes texturais, a densidade de $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, em solo arenoso não apresenta problema de compactação, já em solo argiloso com este mesmo índice apresentaria uma forte compactação (SANCHEZ, 2012). Na avaliação de qualidade do solo é uma propriedade física considerada indicador, pois está relacionada com a sua estrutura, porosidade e taxa de infiltração de água, levando em consideração a textura deste solo (ALVES et al., 2007). A densidade do solo demonstra sua condição estrutural, estando diretamente relacionada a umidade e à resistência a penetração (RP) assim, em condições de degradação do solo, as raízes das plantas tem seu crescimento limitado (BLAINSKI et al., 2008).

Segundo Reichert et al. (2010) a resistência a penetração tem sido utilizada para identificar camadas compactadas e mudanças nas propriedades físicas do solo associadas aos seus horizontes. Segundo Blainski et al., (2008) uma RP entre 1,0-3,5 MPa limita o crescimento radicular.

O solo é composto por partículas sólidas, sendo que da organização destas partículas originam-se espaços de diferentes tamanhos, denominados poros, compondo a fração volumétrica do solo ocupada pelo ar e pela água (RIBEIRO et al., 2007). A porosidade é um importante atributo que confere condições adequadas para o desenvolvimento radicular e a existências de organismos vivos.

Segundo Lepsch (2011) os poros ocupam cerca da metade do volume do solo e observam-se dois tipos, os macroporos, maiores que 0,06 mm, onde a água e o ar encontram maior facilidade de movimentação e os microporos, menores que 0,06 mm, que devido à capilaridade, a água permanece por mais tempo, sendo estes, de fundamental importância para o desenvolvimento das plantas, principalmente em períodos de déficit hídrico (SANCHEZ, 2012).

A fase gasosa é denominada de ar do solo e a fase líquida, que é chamada de solução do solo, contém os nutrientes. Segundo Ferreira & Dias (1997), as proporções relativas das fases sólida, líquida e gasosa no solo variam continuamente e dependem de condições climáticas, vegetação e, sobretudo, manejo sendo a porosidade no solo diretamente relacionada com sua estrutura, que por sua vez está relacionada com a matéria orgânica do solo.

A permeabilidade à água de um solo é influenciada diretamente pelos diferentes sistemas de uso e manejo, pois estes interferem na quantidade e dimensão dos poros (BEUTLER et al., 2001). A umidade do solo influencia na aeração, temperatura e na sua resistência mecânica, que são afetadas pela densidade e distribuição do tamanho de poros do solo. Esses atributos físicos interagem entre si e regulam o crescimento e a funcionalidade das raízes, com reflexo no crescimento e produtividade das plantas cultivadas (COLLARES et al., 2006).

Um fenômeno que demonstra as boas condições físicas de um solo é a infiltração de água, pois está relacionada às suas condições estruturais, sendo um indicador de qualidade (ALVES et al., 2007).

Quanto às propriedades químicas do solo muito se sabe também sobre a influência do pH, da CTC, MO, e da CEa do solo na produtividade das culturas.

Segundo Nicolodi et al. (2008), as relações entre os indicadores de acidez e a produtividade relativa das culturas são semelhantes e altamente significativas, independentemente da camada de solo avaliada. O pH é utilizado universalmente para diagnosticar o estado de acidez do solo e indicar a necessidade ou não de calagem (KAMINSKI, 1989).

A matéria orgânica exerce efeitos positivos na produtividade das culturas por favorecer a melhoria física, química e biológica do solo (SANTOS et al., 2006a). Ela constitui uma fonte de nutrientes para as plantas muito mais complexa e equilibrada do que os adubos minerais, visto que na sua composição apresenta macro e micronutrientes, que são liberados de forma gradual de acordo com as exigências das culturas, sendo que não ocorrem perdas por lixiviação, proporcionando economia no consumo de fertilizantes minerais (MELO et al., 2000). A disponibilidade dos nutrientes para as plantas depende da taxa de mineralização da matéria orgânica (FERREIRA et al., 2003).

Já a capacidade de troca iônica dos solos representa a graduação da capacidade de liberação de vários nutrientes, favorecendo a manutenção da fertilidade por um prolongado período e reduzindo ou evitando a ocorrência de efeitos tóxicos da aplicação de fertilizantes.

(EMBRAPA, 2010).

Quanto à condutividade elétrica da solução do solo, caso apresentasse valores inferiores ao máximo tolerado pela cultura, sem decréscimo na produtividade relativa, e superiores ao mínimo necessário para sua nutrição, a salinização estará controlada (BURGUEÑO, 1996).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Definição da área de estudo

Para maior detalhamento e entendimento do comportamento da variabilidade espacial do potencial produtivo para o tipo de solo da região, foi utilizada uma área comercial com histórico da variabilidade espacial da produtividade das culturas comerciais cultivadas. Assim, foi selecionado um produtor da região centro-oeste do estado do Paraná, que já utilizava monitores de produtividade embarcados em suas colhedoras, tendo assim um banco de dados de produtividade das culturas.

A área selecionada pertence à Fazenda Modelo, no município de Cândói-PR, Centro-Sul Paranaense, situado na coordenadas 51° 47' 32,55" de longitude Oeste e 25° 31' 12,85" de latitude Sul, com altitude média de 910 m, tendo uma área total de 51,55 hectares. A precipitação anual média na região é de 1.900 a 2.100 mm, bem distribuídos nos diferentes meses do ano, caracterizando clima tipo Cfb (Köppen), com verão ameno e geadas severas no inverno (IAPAR, 2000). De acordo com mapa atualizado de solos do Estado do Paraná (EMBRAPA, 2008), a área de estudo encontra-se na unidade de mapeamento LBd5, constituída por Latossolos Brunos distróficos úmbricos.

Os dados de produtividade disponíveis para a área selecionada foram da cultura de milho da safra 2014/15, e da cultura do feijão da safra 2015, ou seja, semeada logo após a colheita da cultura do milho. Para maior detalhamento da variabilidade de produtividade da área, estava planejado utilizar também os mapas posteriores à essas duas culturas, sendo o trigo (safra inverno 2015) e soja (safra verão 2015/2016). No entanto, devido à problemas operacionais tanto na condução das culturas seguintes como na coleta dos dados de produtividade com monitor, esses dados não foram possíveis de serem utilizados.

A cultura do milho foi semeada no dia 11/09/2014 e colhida no dia 11/02/2015. O híbrido semeado foi o P1630H, com população final de 78.000 plantas por hectare, com espaçamento de 40 cm entre linhas. A adubação de base utilizada foi de 310 kg de fertilizante formulado NPK (13-35-10 + Zn) no sulco de semeadura e a adubação de cobertura utilizada foi de 470 kg de Uréia e 100 kg de KCl, ambos aplicados a lanço.

A cultura do feijão foi semeada no dia 12/02/2015 e colhida no dia 29/06/2015. A cultivar semeada foi a IPR-Tuiuiú, com população final de 220.000 plantas por hectare, com espaçamento de 40 cm entre linhas. A adubação de base utilizada foi de 200 kg de fertilizante formulado NPK (13-35-10 + Zn) no sulco de semeadura e a adubação de cobertura utilizada

foi de 120 kg de Uréia e 100 kg de KCl, ambos aplicados a lanço.

Os dados de colheita foram obtidos com monitor da marca Case IH, modelo AFS 700 PRO, embarcado em uma colhedora também da Marca Case IH, modelo Axial Flow 2799.

Primeiramente, os dados de produtividade disponíveis da área foram interpolados pelo método da krigagem local no programa computacional VESPER 1.6 (MINASNY et al., 2002), com grade de 5 metros, para elaboração dos mapas de produtividade. Os dados foram posteriormente trabalhados em SIG dedicado para manejo da variabilidade na agricultura, programa computacional SMS Advanced. Foi utilizada classificação de quebras naturais para apresentar os dados de produtividade, a qual busca minimizar a variância intra classes e maximizar a variância inter classes (GIRARDI, 2008), ou seja, os dados com menor variação são agrupados. Foram usadas 7 classes.

Para verificar se os mapas possuíam o mesmo comportamento de variabilidade espacial de produtividade, foi realizada análise de correlação de Pearson pixel à pixel desses mapas. As análises de correlação foram realizadas no software STATISTICA 10. Caso fosse significativa ao nível de 5%, o valor de correlação estipulado como mínimo foi de 0,3 (AMADO et al., 2007).

Devido ao fato das culturas apresentarem distintos patamares de produtividade, foi realizada a padronização convertendo-se os dados de produtividade em porcentagem em relação à máxima produtividade da área, ou seja, em produtividade relativa. Com os dados no mesmo patamar de produtividade, foi realizada a média pixel a pixel no programa computacional SMS Advanced, para gerar um único mapa de produtividade relativa normalizada (PRODrn) das duas culturas, sendo utilizada classificação por quebras naturais para apresentar os dados. Foram determinadas 4 classes de produtividade relativa dentro da área, classificadas como produtividade alta, acima de 89,68 %, média alta, entre 89,68 e 86,01 %, média baixa, entre 86,01 e 81,04 %, e baixa, abaixo de 81,04 %.

Como nos arquivos de produtividade estavam presentes os dados de elevação da área, os dados foram aproveitados na pesquisa. Esses dados também foram interpolados pelo método da krigagem local no programa computacional VESPER 1.6 (MINASNY et al., 2002), com grade de 5 metros.

Com base nos dados de elevação, foi obtido o mapa de declividade da área, utilizando o software Surfer 11. Os dados de elevação interpolados foram convertidos em valores de declividade, e também utilizados na investigação. Para apresentar os dados de elevação e declividade, foi utilizada classificação de quebras naturais. Foram utilizadas 7 classes.

4.2. Condutividade Elétrica Aparente (CEa)

Para a mensuração da CEa na área experimental, foi utilizado o equipamento que mede a CEa pelo método do contato direto, Veris MPS3 (Figura 1a), que utiliza como eletrodos discos de corte lisos que cortam os resíduos vegetais e penetram no solo a uma profundidade de 5 a 7 cm. Esse equipamento possui seis discos de corte, devidamente espaçados para promover leituras de CEa na camada de 0 a 30 cm (CEa Rasa) e 0 a 90 cm (CEa Profunda), onde dois discos são utilizados para emitir corrente elétrica alternada no solo e quatro discos, um par para cada profundidade, medem a voltagem resultante (Figura 1b). No entanto, para os fins desse trabalho, apenas foi utilizada a CEa rasa.

O equipamento possui um coletor de dados próprio com capacidade de leitura contínua de dados obtidos no campo, realizando a gravação dos valores de CEa para as duas profundidades, simultaneamente, num intervalo de 1 s, sendo os valores de CEa expressos em mS m^{-1} . O sistema georreferencia as medições de CEa utilizando um receptor de GPS e armazena os dados em formato digital de texto ASCII.

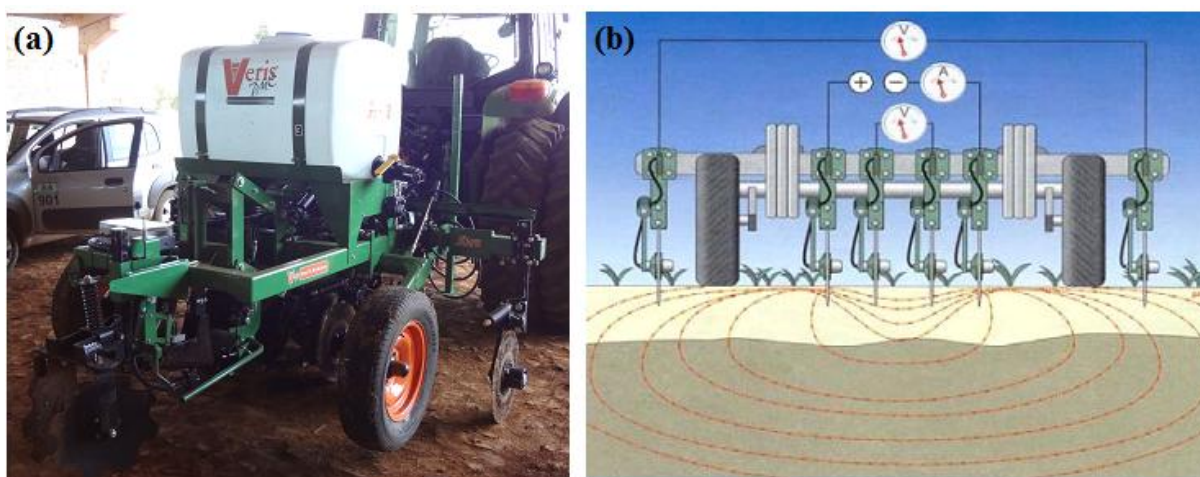


Figura 1. Equipamento mensurador de CEa utilizado no trabalho (a), esquema de funcionamento do equipamento (fonte: manual do fabricante) (b).

O equipamento trafegou paralelamente a cada 30 metros de espaçamento, sendo rebocado por um trator de 110 CV, a uma velocidade de 10 km h^{-1} . Para verificar se não houve influência da variação da umidade e temperatura nos dados de CEa ao longo do dia, foram realizadas duas passadas adicionais aleatórias e perpendicularmente ao sentido das passagens de coleta realizadas.

Os dados foram interpolados pelo método da krigagem local no programa computacional VESPER 1.6 (MINASNY et al., 2002), com grade de 5 metros, para elaboração

do mapa de CEa. Os dados foram posteriormente trabalhados no programa computacional SMS Advanced. Foi utilizada classificação de quebras naturais para apresentar os dados de CEa, sendo usadas 7 classes.

4.3. Análises Físicas e Químicas do Solo

Para as avaliações químicas e físicas do solo, foram determinadas três classes de profundidade alocadas na camada de 0 a 40 cm (0 a 15, 15 a 25 e 25 a 40 cm). A determinação dessas classes foi baseada na realização de amostragens direcionadas para homogeneizar o comportamento das propriedades físicas desse solo. Para tanto, foi realizada previamente a avaliação da resistência à penetração da área selecionada, também de 0 a 40 cm, em 40 pontos aleatórios da área, de modo a obter maior representatividade possível.

As coletas de solo e avaliações físicas e químicas foram direcionadas em função das quatro classes de produtividade, sendo que cada uma dessas quatro classes teve também quatro repetições, tendo-se assim, 16 pontos de coleta pré-definidos. Como a intenção não foi a de fazer comparação de mapas, e sim realizar a comparação e identificação dos padrões de comportamento em cada um dos 16 pontos, as coletas químicas e físicas foram realizadas exatamente no local onde o equipamento leitor de CEa passou. Como em muitos casos, os pontos pré-definidos não coincidiram com as passadas paralelas equidistantes do Veris, os mesmos foram deslocados em no máximo 15 metros, de maneira a coincidirem com os locais de passagem do Veris. Desta forma, logo após a passagem do Veris, foi realizada a avaliação da resistência à penetração em cada um dos 16 pontos definitivos. Exatamente nesses mesmos pontos, foram abertas trincheiras (Figura 2) para facilitar a coleta de dados e das amostras de solo para posteriores análises físicas e químicas.

Essas trincheiras foram georreferenciadas, para que posteriormente os dados coletados nelas pudessem ser comparados com os dados de produtividade das culturas na área.

Para a determinação da granulometria foi coletada uma amostra de solo deformada em cada uma das três camadas definidas, na parede da trincheira aberta.

Para a determinação da porosidade, capacidade de armazenamento de água e de ar, densidade, e umidade do solo no momento da passagem do Veris pelos pontos de amostragem, foram coletadas amostras indeformadas utilizando anel volumétrico de aço inox de 100 cm³, sempre na posição intermediária de cada camada definida, ou seja, 7,5 a 12,5 cm na camada de 0 a 15 cm, 17,5 a 22,5 cm na camada de 15 a 25 cm, e 30 a 35 cm na camada de 25 a 40 cm. Para cada camada, em cada ponto de coleta, foram retirados dois anéis, ou seja,

duas repetições. As amostras de solo foram envoltas em papel alumínio e mantidas sob refrigeração, até o momento das determinações, para não perderem umidade. No mesmo dia da coleta os anéis foram pesados, para assim posteriormente poder ser calculada a umidade em que o solo estava no momento da passagem do Veris.



Figura 2. Abertura de trincheira nos pontos de coleta dos atributos físicos e químicos do solo, exatamente no local da passagem do Veris, logo após a passagem do mesmo.

Pelo fato da umidade do solo poder estar relacionada à CEa, tendo sido inclusive fator de estudo desse trabalho, todas as coletas foram realizadas no mesmo dia, para evitar ao máximo que houvesse influência da variação temporal do conteúdo de água no solo, na variabilidade espacial desse atributo.

4.3.1. Porosidade do Solo

A determinação da porosidade do solo foi realizada com as amostras dos anéis volumétricos coletados na área. Em laboratório, as amostras foram saturadas em bandejas, com uma lâmina de água até a borda superior dos anéis por 48 horas. A obtenção do conteúdo de água, nos potenciais matriciais de -1 e -6 kPa, foi realizada com uso de uma mesa de tensão. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 48 horas e pesadas para a determinação da massa de sólidos seca.

A estimativa da macroporosidade, microporosidade e porosidade total foi realizada de acordo com a metodologia de EMBRAPA (2011). A macroporosidade foi estimada pela diferença entre o conteúdo de água do solo saturado e o conteúdo de água no potencial

matricial de -6 kPa, equivalendo aos poros com diâmetro superior a 0,06 mm. A determinação da microporosidade foi realizada pela diferença entre o conteúdo de água do solo retido no potencial matricial de -6 kPa, equivalendo aos poros com diâmetro inferior a 0,06 mm, e o solo seco à 105 °C. A porosidade total do solo foi estimada como a diferença entre o conteúdo de água do solo saturado e a massa de sólidos seca.

A porosidade no domínio dos macroporos e a porosidade no domínio da matriz do solo foi realizada segundo metodologia proposta por Reynolds et al. (2002). A porosidade no domínio dos macroporos é definida como o volume de poros drenados entre a saturação e o potencial mátrico de -1 kPa e equivale aos poros com diâmetro superiores a 0,3 mm. A porosidade no domínio da matriz do solo é definida pelo volume de poros com água no potencial mátrico de -1 kPa e equivale aos poros com diâmetro inferior a 0,3 mm.

4.3.2. Capacidade de Armazenamento de Água e de Ar do Solo

A determinação da capacidade de armazenamento de água e de ar do solo foi realizada com as amostras dos anéis volumétricos coletados na área. Após serem realizadas as avaliações de porosidade, foi realizada a obtenção do conteúdo de água no potencial matricial de -10 kPa, também com uso da mesa de tensão. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 48 horas e pesadas para a determinação da massa de sólidos seca.

A capacidade de armazenamento de água do solo (CC/Pt) foi calculada por meio das relações entre o conteúdo de água do solo retido no potencial matricial equivalente à capacidade de campo (CC), a qual é determinada no potencial matricial de -10 kPa, com a porosidade total do solo (Pt). A capacidade de armazenamento de ar do solo (CAt/Pt) foi calculada pelo quociente entre o volume de poros drenados entre o solo saturado e o potencial matricial de -10 kPa (CAt), em relação à porosidade total do solo (Pt). Por último, foi calculada a capacidade de aeração da matriz do solo (CAMatriz), definida como o volume de poros drenados entre o potencial matricial de -1 kPa e solo seco em estufa a 105°C, também conforme proposição de Reynolds et al. (2002).

Na Figura 3 é ilustrada a distribuição dos poros, em razão dos indicadores tradicionais (macroporosidade, microporosidade e porosidade total) e os indicadores propostos por Reynolds et al. (2002).

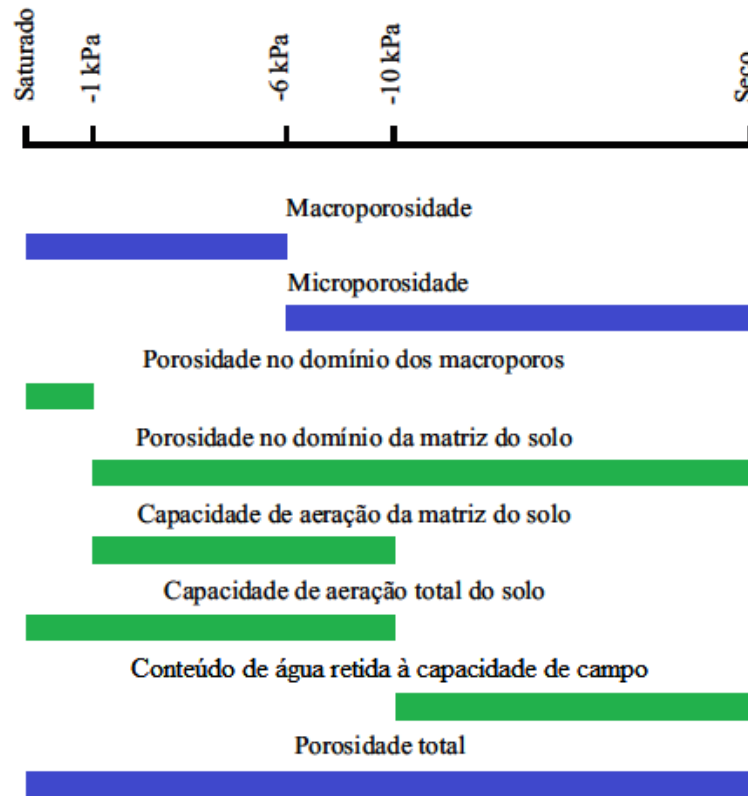


Figura 3. Distribuição dos poros relativos aos atributos de porosidade tradicionais (macroporosidade, microporosidade e porosidade total) e de porosidade e capacidades de armazenamento propostos por Reynolds et al. (2002). Adaptado de Fidalski et al (2008).

4.3.3. Densidade do Solo e Densidade Relativa

A determinação da densidade do solo foi realizada com as amostras dos anéis volumétricos coletados na área. Após fazer a pesagem das amostras para determinação da porosidade e capacidade de armazenamento, a amostra foi colocada na estufa a 105°C por 48 horas, retirada e pesada. A densidade foi calculada pela equação 2.

$$D_s = M_s/V \quad (2)$$

em que,

D_s = densidade do solo (g cm^{-3})

M_s = massa de solo seca a 105°C (g)

V = volume do anel ou cilindro (cm^3)

Também foi realizada a avaliação da densidade relativa para cada amostra, que foi determinada pela relação entre a densidade do solo (D_s) e o grau de compactação máxima do solo obtida pelo ensaio de Proctor, para cada uma das três camadas pré-definidas. Esse valor

foi usado como padrão da área para se determinar a densidade relativa. Foram coletados aproximadamente 30 kg de solo em três pontos aleatórios da área. Após a coleta, o solo foi seco em estufa, desagregado, e passado em peneira de malha 4 mm. Após esse procedimento, as amostras foram submetidas ao ensaio de Proctor normal, que consiste na utilização de impacto resultante de carga fixa em amostras de solo submetidas a diferentes umidades, resultando em uma curva a qual representa a densidade alcançada em função da umidade. Para simulação da carga de impacto, utiliza-se como equipamento básico um soquete de 2,5 kg, um molde cilíndrico metálico com diâmetro de 10 cm e altura de 12,73 cm e um anel complementar metálico que permite a compactação da terceira camada de material no interior do cilindro (Figura 4).



Figura 4. Cilindro e soquete do conjunto utilizado no ensaio de Proctor (a) e cilindro preenchido com a terceira camada de solo compactada (b).

Posteriormente foi aplicada a derivada da equação de regressão para as curvas de cada camada, encontrando-se assim o ponto de máxima inflexão da curva, ou seja, o máximo grau de compactação obtido e a respectiva umidade em que o solo se encontrava para alcançar tal valor de densidade.

4.3.4. Umidade do Solo

A avaliação da umidade em que o solo estava no dia da coleta, também foi realizada com base na coleta dos anéis. No momento da coleta dos anéis, foi realizada a pesagem dos mesmos para verificar a massa úmida da amostra. Após ser realizada a avaliação da densidade do solo na estufa a 105°C obteve-se a massa da amostra seca. Pela diferença da amostra

úmida e da amostra seca, se determinou a massa de água de cada amostra. A umidade gravimétrica (θ_g) foi obtida pela relação entre a massa de água da amostra e a massa da amostra seca. A umidade volumétrica das amostras (θ_v) foi obtida pela relação entre a massa de água da amostra e o volume do anel.

Além disso, foi realizada a avaliação da umidade por meio de um instrumento eletrônico portátil de obtenção da umidade gravimétrica instantânea (θ_e) exatamente na mesma profundidade em que foram coletados os anéis (Figura 5).



Figura 5. Avaliação da umidade por meio de um instrumento eletrônico portátil de obtenção da umidade gravimétrica instantânea

4.3.5. Granulometria

A análise granulométrica foi realizada no Laboratório Físico Químico da Fundação ABC, em Castro-PR, o qual utiliza o método da pipeta (IAC, 2009).

4.3.6. Resistência do Solo à Penetração

A determinação dos níveis de resistência do solo à penetração (RP) foi realizada logo após a passagem do Veris. Foi realizada através da utilização de um amostrador eletromecânico, da marca Falker, modelo SoloStar, acoplado a um quadriciclo de marca

Honda, modelo Fourtrax (Figura 6). Em cada ponto foram realizadas 4 repetições, na profundidade de 0 a 40 cm. Os resultados foram tabulados em planilha eletrônica, sendo agrupados de acordo com as profundidades em que foram realizadas as coletas dos demais atributos. Também foi realizado o agrupamento pelas profundidades em que foram alocados os anéis volumétricos.



Figura 6. Conjunto amostrador eletromecânico de resistência do solo à penetração.

4.3.7. Análises Químicas do Solo

Para determinar os teores de P, K, Ca, Mg, S, CTC, SB, V%, H+Al, Al, pH, MO e CEss, foi coletada uma amostra de solo deformada em cada uma das três profundidades definidas, na parede da trincheira aberta. Essas amostras foram enviadas para o Laboratório Físico Químico da Fundação ABC, em Castro-PR, o qual segue metodologia do IAC (2009) para determinar MO (extrator $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), pH (CaCl_2), S [extrator $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$], H+Al (extrator SMP), Al, Ca e Mg (extrator KCl), e metodologia da EMBRAPA (2011) para determinar P e K (extrator Mehlich).

4.4. Análises estatísticas

Pelo fato de os dados terem sido coletados sempre em 3 profundidades distintas, já se esperando que houvessem diferenças entre as mesmas, as análises estatísticas também foram realizadas para cada uma das 3 camadas de modo separado, para verificar quais atributos se relacionam em cada uma delas.

Os métodos estatísticos podem ser dispostos em dois grupos. Um deles trata da estatística que considera as variáveis de maneira isolada, a estatística univariada. O outro trata das variáveis de forma conjunta, a estatística multivariada. No caso desse trabalho, como foram levantadas 39 variáveis, com o objetivo de identificar quais desses atributos investigados estão correlacionados entre si, com a CEa e com a produtividade das culturas, optou-se pelo método multivariado. Para cada uma das 3 camadas foram utilizadas as 16 informações de cada atributo avaliado.

Para ser possível realizar esse tipo de análise, existem algumas premissas que precisam ser atendidas. Primeiramente há a necessidade de que exista uma estrutura de correlação entre as variáveis, pois, se as mesmas não estiverem ligadas entre si, tem-se que utilizar uma análise univariada. Conforme Reis (1997), “a matriz de correlação poderá permitir identificar subconjuntos de variáveis que estão muito correlacionadas entre si no interior de cada subconjunto, mas pouco associadas à variáveis de outros subconjuntos”. Nesse caso, para verificar se é possível explicar esse padrão de correlações mediante um menor número de variáveis optou-se por utilizar a técnica de Análise de Fatores (AF), utilizando como modo de extração de fatores a Análise de Componentes Principais (ACP).

Assim, primeiramente foi realizada a análise de correlação entre as variáveis, pela análise de correlação de Pearson (r), para verificar a existência de variáveis que não estão correlacionadas com nenhuma outra na matriz de correlação. Essa é uma das premissas da AF. Caso a variável não tenha apresentado coeficiente de correlação mínimo de 0,3 com nenhuma outra variável, ela foi excluída da análise multivariada.

Após isso, ainda com o uso da matriz de correlação foram retiradas da análise as multicolinearidades, ou seja, variáveis que tem outro nome, estão em outro patamar, mas tem o mesmo significado prático, sendo altamente correlacionadas entre si. Essa é outra premissa da AF, que se não for realizada, dificulta a interpretação dos resultados, pois ao invés de relacionar variáveis que possam apresentar relação causa-efeito, relaciona variáveis que já se sabe serem sinônimas, empobrecendo a capacidade de exploração da análise. Dessa forma, caso a variável tenha apresentado coeficiente de correlação maior que 0,9 com outra variável

que se sabe serem sinônimas, ela foi excluída da AF.

Com as variáveis já devidamente selecionadas, foi iniciada a AF, realizando a extração dos fatores pela ACP no software STATISTICA 10. O objetivo da ACP é transformar um conjunto de variáveis que se relacionam entre si em um conjunto único (componente principal ou fator), sendo que esses novos componentes não devem ter relação entre eles. Os fatores podem ser associados com uma variável individual (fatores únicos), ou, ainda, associados com duas ou mais das variáveis originais (fatores comuns). Isso pode ser denominado de redução dos dados, e não tem relação com exclusão de variáveis. As variáveis que se relacionam apenas são re-escritas de maneira mais simples, para facilitar o entendimento. No entanto, pode ser que algumas variáveis sejam excluídas durante a análise por não se relacionarem com nenhuma outra e/ou por não serem representativas na variação total dos dados, ou seja, possuem pouca informação ou relevância no modelo gerado na AF.

Após a extração dos fatores, um passo importante é a determinação do número de fatores a serem retidos para serem utilizados na análise de fatores. Um método bastante utilizado é a retenção pelo critério de Kaiser-Guttman ou do autovalor > 1 (PATIL et al., 2008). Autovalor é a variância total que pode ser explicada pelo fator ou seja, avalia a contribuição de cada fator ao modelo construído pela análise fatorial. Se a explicação da variância pelo fator for alta, existe uma alta explicação desse fator ao modelo, se for baixa, existe uma baixa explicação do fator ao modelo. A soma total dos autovalores é sempre igual ao número de variáveis utilizadas na análise. Dessa forma, um fator com autovalor < 1 apresenta variância explicada menor do que uma única variável. Como o objetivo da AF é reduzir um determinado número de variáveis observadas em um número menor de fatores, apenas fatores com autovalor > 1 são interessantes (FLOYD e WIDAMAN, 1995) portanto, o número de fatores foi definido selecionando-se apenas fatores com autovalor > 1 .

Para verificar se as variáveis devem ser mantidas, ou seja, tem informação suficiente para explicar o modelo formado, são geradas e analisadas as cargas fatoriais para os fatores selecionados (autovalor > 1), também no software STATISTICA 10. Cargas fatoriais são as cargas que as variáveis apresentam individualmente dentro de cada fator. A carga fatorial é um coeficiente, um número decimal positivo ou negativo (pode variar de -1 a $+1$) que expressa o quanto a variável observada está carregada em um fator.

Quanto maior for a carga de um fator (em módulo), mais a variável se identifica com o fator. Se a variável apresentar carga igual ou maior que $0,7$ (em módulo) em algum fator, ela deverá ser mantida na análise, pois tem grande relevância na explicação do modelo proposto para o conjunto de dados considerado. Se o fator for comum à duas ou mais variáveis, essas

variáveis podem ser diretamente relacionadas, se tiverem o mesmo sinal (ambos negativos ou ambos positivos), ou podem ser inversamente relacionadas, se tiverem sinal oposto (um negativo e outro positivo).

Para ter-se uma melhor visualização das variáveis, que melhor representem cada fator, é realizada uma rotação nos eixos, pois a AF busca alocar os fatores em uma posição mais simples, com respeito às variáveis originais, que ajudam na interpretação de fatores. Essa rotação coloca os fatores em posições em que serão associadas só às variáveis relacionadas distintamente a um fator.

A rotação utilizada foi a rotação ortogonal, do tipo *varimax normalized*, a qual busca minimizar o número de variáveis com altas cargas num único fator, ou seja, maximiza a variância da carga. Conforme Pereira (2001), a rotação da matriz não afeta a inércia (comunalidades) das variáveis nem a percentagem de variações explicadas pelos fatores. Por isso, a rotação é segura e deixa mais claro o valor da carga ou participação da variável no fator. Se mesmo após a rotação, alguma variável não apresentar carga de pelo menos 0,7 em algum dos fatores, ela deverá ser retirada da análise, já que tem pouca informação ou relevância na explicação do modelo gerado pela AF.

Sempre que for retirada alguma variável, deve-se realizar novamente todo o processo a partir da análise de componentes principais, até se chegar num conjunto de fatores e respectivas variáveis com cargas satisfatórias (acima de 0,7) em pelo menos e apenas um fator.

O próximo passo foi a obtenção das comunalidades, também no software STATISTICA 10. Comunalidade é a medida de quanto da variância de uma variável, é explicada pelos fatores derivados pela análise fatorial e avalia a contribuição da variável ao modelo construído pela AF, ou seja, o quanto cada variável participa na formação da outra. Nas comunalidades, os valores mais altos são os mais importantes para análise, se a comunalidade para a variável for alta (acima de 0,7), ela permanece no conjunto de dados e se alguma variável não apresentar comunalidade satisfatória (abaixo de 0,7), ela deverá ser retirada da análise devendo-se refazer todo o processo a partir da análise de componentes principais até se chegar num conjunto de fatores e respectivas variáveis com cargas satisfatórias (acima de 0,7) em pelo menos e apenas um fator, e com comunalidades também acima de 0,7.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Definição da área de estudo

Nas Figuras 7 e 8 são apresentados os mapas de produtividade das culturas de milho e feijão disponíveis para a área de estudo.

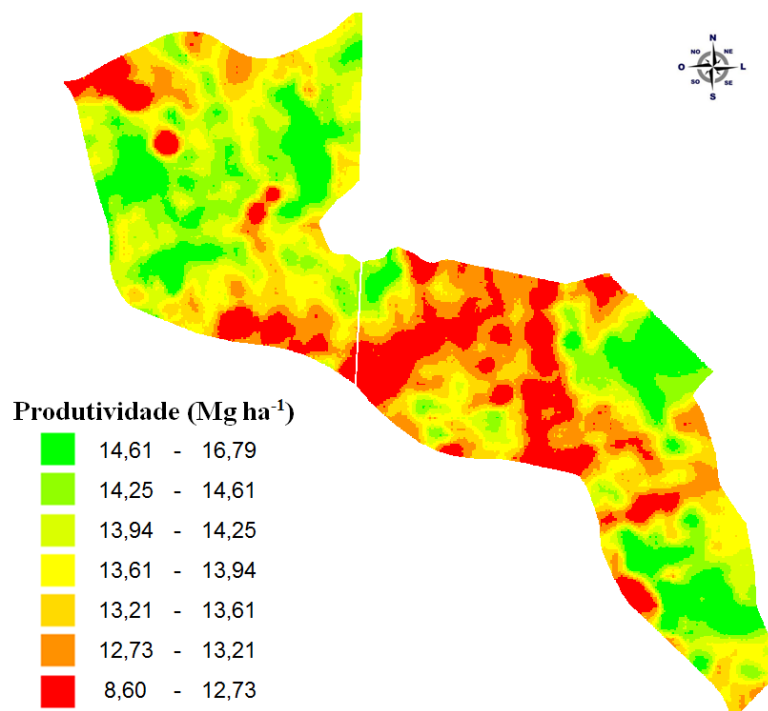


Figura 7. Sete classes de produtividade de grãos da cultura do milho na safra 2014/15 do talhão T.1.08 na Fazenda Modelo, pertencente ao Grupo Karly, no município de Cândói-PR

A produtividade média da área foi de 13,736 Mg ha⁻¹ para a cultura do milho e de 2,285 Mg ha⁻¹ para a cultura do feijão. Na avaliação da correlação de Pearson, encontrou-se um coeficiente de 0,4 ($p < 0.001$), sendo portanto, considerado aceitável para a realização desse trabalho, levando-se em consideração também que 0,3 era o valor estipulado como mínimo, caso apresentasse significância. Amado et al. (2007) trabalhando com as culturas de milho, soja e trigo durante seis safras, encontraram valores de correlação significativos e muito semelhantes, variando de 0,12 a 0,56.

Na Figura 9 está apresentado o mapa normalizado de produtividade relativa das duas culturas. Os dados estão classificados nas quatro classes definidas, sendo também demonstrada a alocação dos 16 pontos de coleta na área.

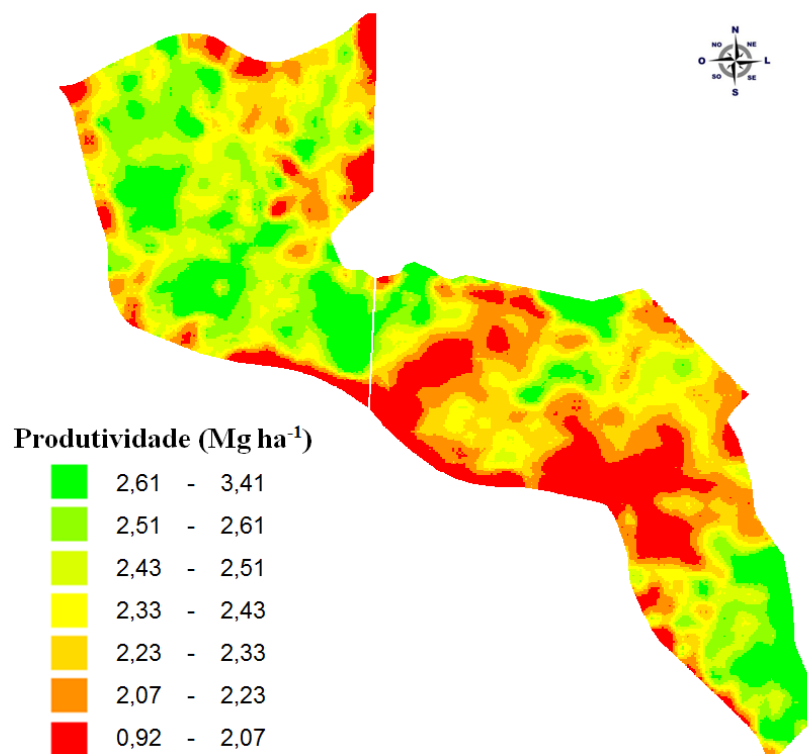


Figura 8. Sete classes de produtividade de grãos da cultura do feijão na safra 2015 do talhão T.1.08 na Fazenda Modelo, pertencente ao Grupo Karly, no município de Candói-PR

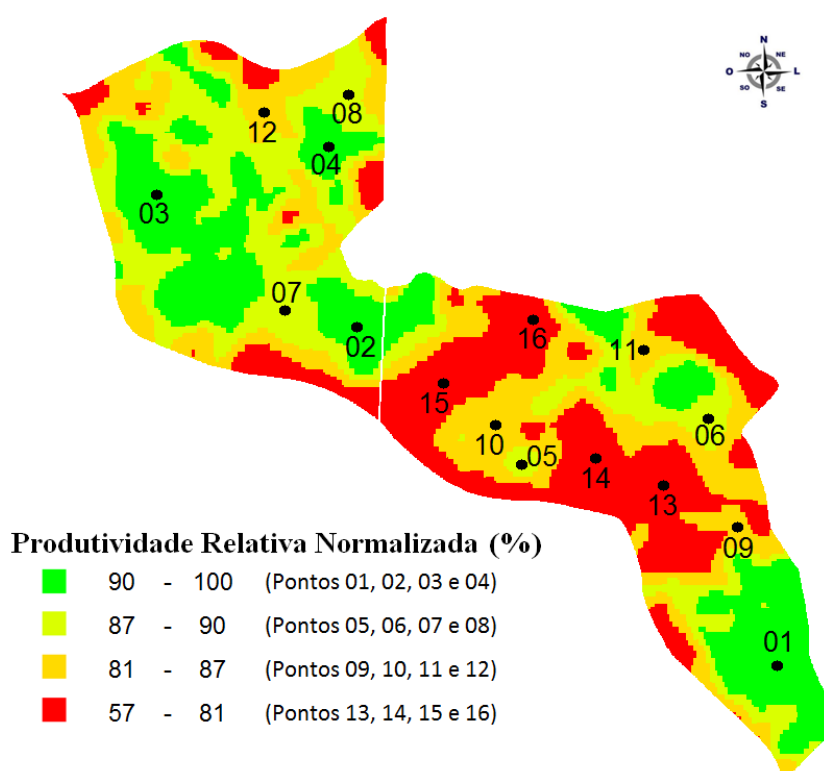


Figura 9. Quatro classes de produtividade relativa normalizada das culturas de milho e feijão com a alocação dos pontos de coleta do talhão T.1.08 na Fazenda Modelo, pertencente ao Grupo Karly, no município de Candói-PR

Na Figura 10 está apresentado o mapa de elevação da área. A elevação variou de 887,31 até 946,75 m em relação ao nível do mar, diferindo em torno de 60 metros.

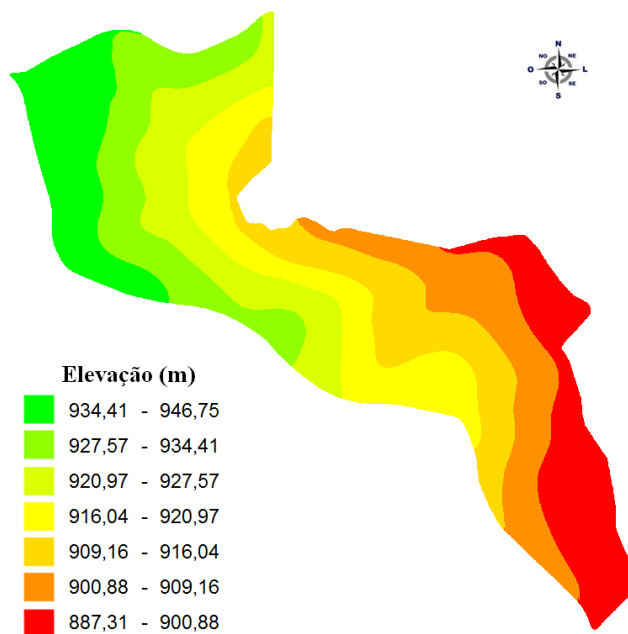


Figura 10. Mapa de elevação do talhão T.1.08 na Fazenda Modelo, pertencente ao Grupo Karly, no município de Candói-PR

Na Figura 11 está apresentado o Mapa de declividade da área, obtido em função do mapa de elevação da área.

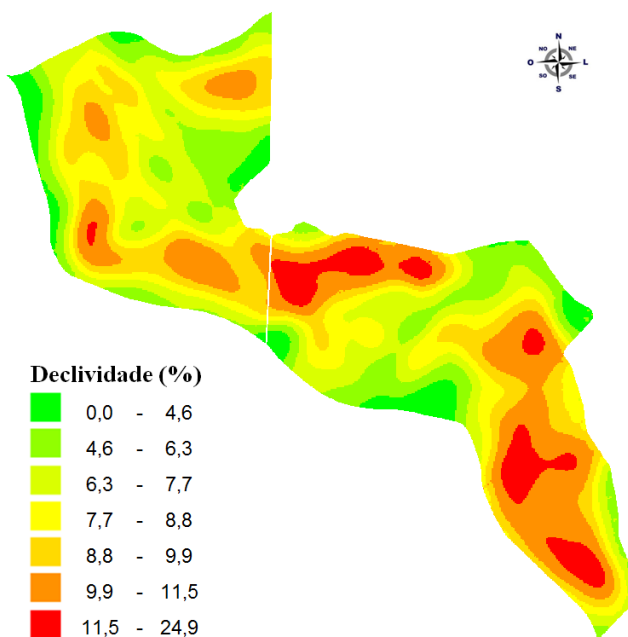


Figura 11. Mapa de declividade do talhão T.1.08 na Fazenda Modelo, pertencente ao Grupo Karly, no município de Candói-PR

5.2. Condutividade Elétrica Aparente (CEa)

Na Figura 12 é apresentado o mapa de CEa da área. Os dados tiveram uma grande variação na área, variando de 4,50 a 40,71 mS m⁻¹.

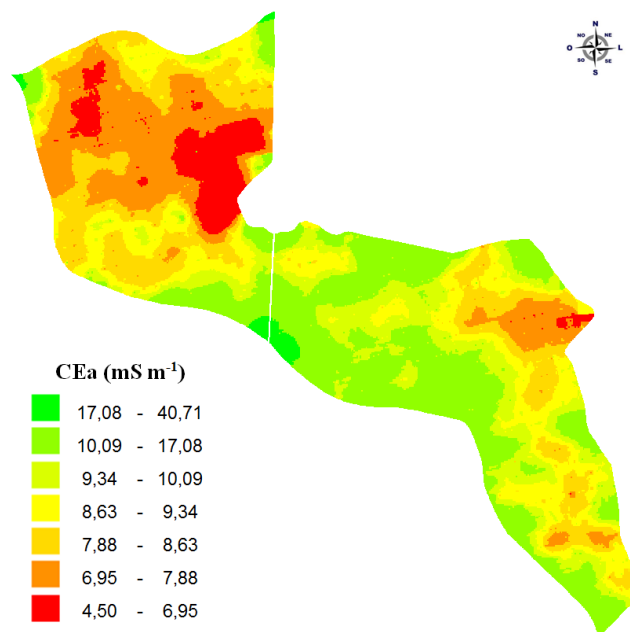


Figura 12. Mapa de condutividade elétrica (CEa) da área realizado com Veris MPS3 no talhão T.1.08 da Fazenda Modelo, pertencente ao Grupo Karly, no município de Candóí-PR

Na Tabela 1 estão apresentados os valores mínimos, máximos, médios, e de distribuição dos dados de produtividade, CEa, elevação e declividade já referentes aos 16 pontos de coleta, em que foram realizadas também as coletas das amostras para investigação dos atributos físicos e químicos do solo.

Tabela 1. Estatística descritiva dos dados de produtividade, CEa, elevação e declividade.

Atributo/Propriedade	Unidade	Mín	Máx	Média	Desv. Pad	CV%
Produtividade relativa normalizada	%	74,20	100,00	86,72	7,49	8,64
Produtividade da cultura do Feijão (safra 2015)	Mg ha ⁻¹	1,86	2,84	2,33	0,28	12,11
Produtividade da cultura do Milho (safra 2014/15)	Mg ha ⁻¹	12,59	15,73	13,92	0,97	6,98
Condutividade Elétrica aparente do solo	mS m ⁻¹	7,36	11,03	9,15	1,20	13,12
Elevação	m	892,45	936,31	915,49	11,91	1,30
Declividade	%	4,76	12,21	8,76	2,34	26,71

Kramer et al. (2013), obteve produtividade de milho semelhante trabalhando na mesma região. Já para a cultura do feijão, Reichert (2012) encontrou produtividades mais elevadas, em torno de 3,7 Mg ha⁻¹. No entanto, usou data de semeadura que é mais adequada

à produtividade da cultura, sendo considerado ainda como feijão de safra. Como o feijão dessa área de estudo foi semeado na época que pode ser considerada como feijão Safrinha, já eram esperadas produtividades inferiores.

Machado et al., (2006) trabalhando com Veris na região de Carambeí-PR, encontraram valores de CEa variando de 2,4 até 10,9 mS m⁻¹, amplitude maior do que a que foi encontrada nesse estudo. No entanto, a amplitude dos teores de argila encontrados por eles na camada de 10 a 20 cm também foram maiores do que os encontrados nesse estudo (Tabelas 2, 6 e 10), variando de 200 até 700 g dm⁻¹.

5.3. Definição das camadas de coleta

Na Figura 13 estão apresentados os dados de resistência à penetração (RP) no perfil do solo para o levantamento realizado previamente para definir as profundidades de coleta dos demais atributos de solo.

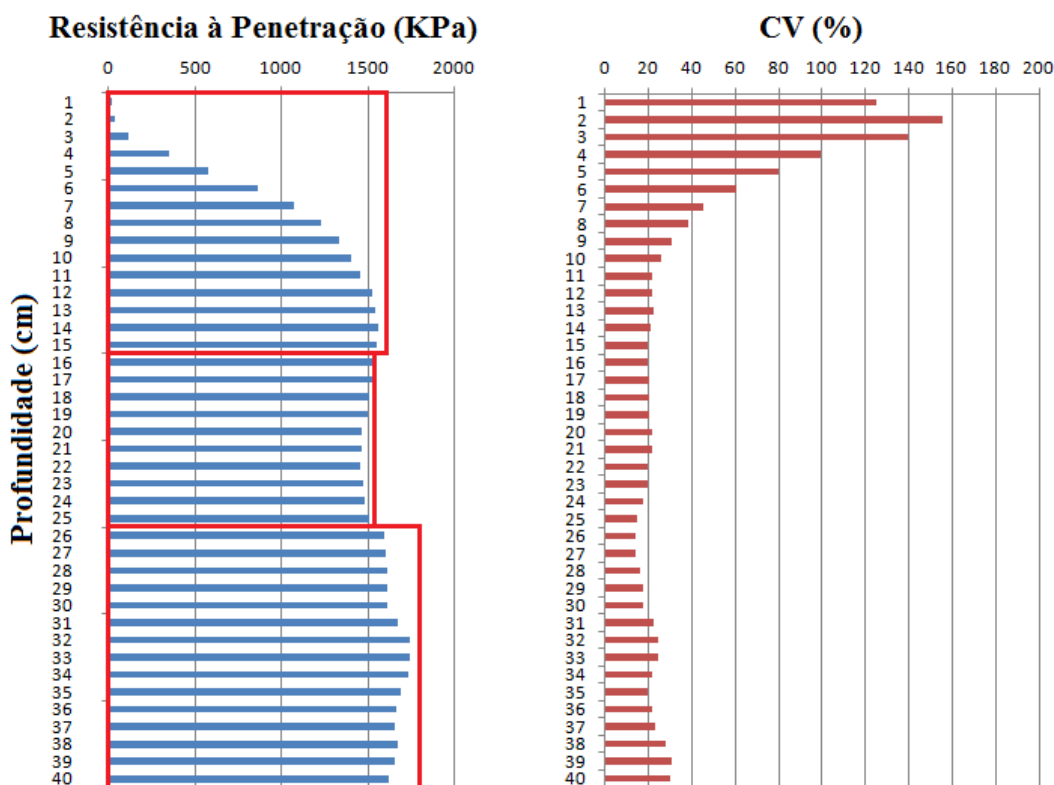


Figura 13. Resistência à penetração no perfil do solo de 0 a 40 cm, respectivas classes de profundidade definidas e coeficiente de variação para cada profundidade

Percebe-se que a RP na área apresentou valores crescentes até os 15 cm de profundidade. Além disso percebe-se uma grande variação até essa profundidade, evidenciada

pelo alto CV % em cada profundidade. Devido a isso, não foi possível estabelecer uma camada homogênea até essa profundidade, considerando-se, portanto, essa camada de 0 a 15 cm como a primeira camada de coleta. Dos 15 até os 25 cm, a RP permaneceu bastante homogênea no perfil do solo, sendo definida essa como a segunda camada de coleta dos demais atributos. Dos 25 até os 40 cm, a RP também permaneceu bastante homogênea no perfil do solo, mas com valores maiores do que na segunda camada. Portanto, essa camada de 25 a 40 cm foi definida como a terceira camada de coleta.

5.4. Determinação do Grau de Compactação Máximo do Solo

As curvas de compactação, obtidas por meio do ensaio de Proctor normal para as três camadas avaliadas são apresentadas na Figura 14. Na camada de 0-15 cm, com 39,9% de umidade, o grau de compactação máximo foi de $1,21 \text{ g cm}^{-3}$. Para a camada de 15-25 cm, com 37,0% de umidade, o grau de compactação máximo foi de $1,24 \text{ g cm}^{-3}$. Para a camada de 25-40 cm, com 38,5% de umidade, o grau de compactação máximo foi de $1,26 \text{ g cm}^{-3}$.

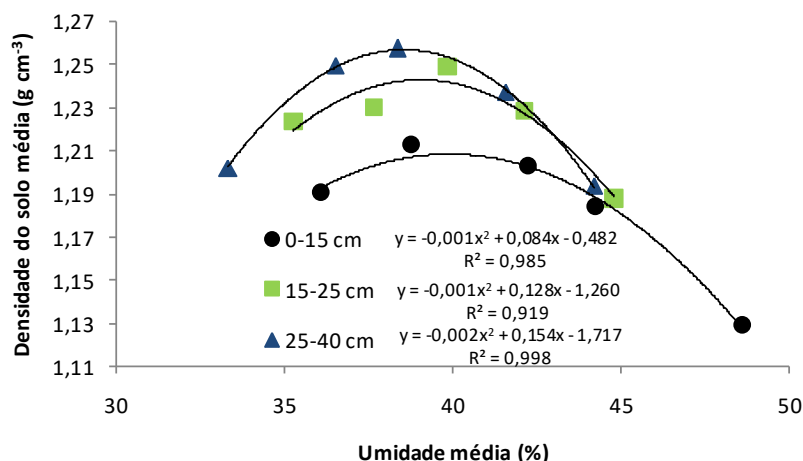


Figura 14. Grau de compactação máxima do solo obtida pelo ensaio de Proctor em função da umidade submetida para as três camadas definidas.

Observa-se que os valores de densidade máxima ficaram relativamente baixos, comparados com outros solos, como por exemplo Braida et al. (2006), que avaliando um Argissolo Vermelho-Amarelo e um Nitossolo Vermelho encontraram valores de grau de compactação máximo de $1,87$ e $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ a 11 e 28% de umidade respectivamente.

Ainda, o solo da camada superior apresentou valores de densidade máxima mais baixos e com um teor de água maior, o que pode estar relacionado com o acúmulo de material orgânico nessa camada (Figura 15), visto que o solo é manejado sob o sistema de plantio

direto. Geralmente, para um nível de energia aplicado no solo, quanto maior for o teor de matéria orgânica menor será a densidade máxima obtida, sendo necessário uma maior quantidade de água.

5.5. Relações entre os atributos investigados

Como as coletas dos atributos físicos e químicos foram realizadas separadas por camadas do solo, também foram analisadas e são apresentadas dessa maneira. Para cada uma foram usados os dados de produtividade, CEa, elevação e declividade, sendo que esses dados são fixos e não se alteram em função da profundidade de coleta.

5.5.1. Relação entre os atributos do solo, produtividade e CEa na camada de 0 a 15 cm

A estatística descritiva dos atributos químicos e físicos obtidos na camada superficial do solo (Tabela 2) demonstra que de maneira geral, os atributos estão com valores de CV % médios (10 a 20%) e altos (20 a 30 %), segundo classificação de Pimentel Gomes, (1985). Mesmo alguns atributos apresentando CV % muito alto (acima de 30 %), isso não se mostra prejudicial para a análise dos dados, já que a estatística é multivariada. A matriz de correlação das variáveis para a camada de 0 a 15 cm (ANEXO 1) indicou que todas satisfizeram a necessidade de correlação de pelo menos 0,3 com alguma outra variável, de tal forma que nenhuma variável teve que ser removida enquanto várias remoções tiveram de ser feitas devido haver multicolinearidade, sendo removidas 14 variáveis: produtividade da cultura do milho, produtividade da cultura do feijão, Dr, RPa, Silte, SB, H+Al, θ_v , PDMatriz, CAMatriz, CAAt, CC/Pt, CAAt/Pt e CC.

Sendo assim, das 39 variáveis iniciais apenas 25 foram selecionadas para a realização da extração de fatores pela análise de componentes principais (ACP). Dessas 25, foram retiradas da análise outras 9 variáveis, que não atenderam os critérios mínimos estabelecidos de carga fatorial e comunalidade, sendo elas declividade, RPc, MO, S, PDMacro, Ca, θ_e , K e macroporosidade.

Ao final foram definidos 6 fatores para explicar 16 variáveis (Tabela 3), atendendo os critérios das cargas fatoriais (Tabela 4) e das comunalidades (Tabela 5).

Tabela 2. Estatística descritiva para os atributos químicos e físicos para a camada de 0 a 15 cm.

Atributo/Propriedade	Unidade	Mín	Máx	Média	Desv. Pad	CV%
P	mg dm ⁻³	5,00	20,00	10,31	4,85	47,07
MO	g dm ⁻³	34,00	60,00	44,31	5,52	12,46
V%	%	34,00	83,00	63,63	12,34	19,39
pH	-	4,80	6,00	5,46	0,31	5,76
H+Al	cmol _c dm ⁻³	2,30	5,80	3,88	1,04	26,73
Al	cmol _c dm ⁻³	0,00	0,22	0,02	0,06	258,90
K	cmol _c dm ⁻³	0,22	0,72	0,37	0,15	41,14
Ca	cmol _c dm ⁻³	2,20	8,70	5,22	1,65	31,69
Mg	cmol _c dm ⁻³	0,60	2,30	1,52	0,47	30,90
SB	cmol _c dm ⁻³	3,04	11,34	7,11	2,14	30,09
CTC	cmol _c dm ⁻³	7,17	13,64	10,98	1,68	15,29
S	mg dm ⁻³	6,00	30,00	14,75	8,99	60,97
CEss	dS m ⁻¹	0,05	0,12	0,07	0,02	29,03
RPc	kPa	653,53	1192,17	862,37	139,22	16,14
RPa	kPa	648,21	1461,92	1063,79	208,48	19,60
Argila	g dm ⁻³	488,00	764,00	679,94	70,19	10,32
Silte	g dm ⁻³	172,00	434,00	244,06	70,23	28,77
Areia	g dm ⁻³	55,00	110,00	76,00	14,92	19,63
θe	%	39,30	54,25	44,49	4,24	9,53
θg	g g ⁻¹	0,50	0,55	0,52	0,02	3,39
θv	g cm ⁻³	0,41	0,55	0,47	0,03	6,85
Ds	g cm ⁻³	1,00	1,20	1,13	0,06	5,60
Dr	%	81,02	99,05	91,64	5,14	5,60
Macroporosidade	%	2,09	5,28	3,88	0,79	20,33
Pt	%	55,70	61,19	58,38	1,34	2,30
Microporosidade	%	52,18	57,30	54,51	1,37	2,52
CC	%	51,20	56,11	53,52	1,47	2,76
PDMacro	%	1,41	2,72	2,10	0,34	16,15
PDMatriz	%	53,74	58,92	56,28	1,31	2,32
CAMatriz	%	0,98	5,05	2,76	1,05	38,10
CAt	%	2,39	7,20	4,87	1,19	24,52
CC/Pt	-	0,88	0,96	0,92	0,02	2,16
CAt/Pt	-	0,04	0,12	0,08	0,02	23,80

Tabela 3. Autovalores para os 15 fatores formados e linha de corte para 16 variáveis na camada de 0 a 15 cm.

Componente	Autovalor	Variância total da Componente (%)	Autovalor Cumulativo	Variância acumulada (%)
1	4,58	28,62	4,58	28,62
2	3,63	22,70	8,21	51,32
3	2,43	15,20	10,64	66,52
4	1,67	10,43	12,31	76,96
5	1,22	7,65	13,54	84,61
6	1,08	6,74	14,62	91,35
7	0,55	3,46	15,17	94,80
8	0,33	2,08	15,50	96,89
9	0,26	1,63	15,76	98,52
10	0,13	0,82	15,89	99,34
11	0,06	0,34	15,95	99,68
12	0,04	0,23	15,99	99,92
13	0,01	0,05	15,99	99,97
14	0,00	0,03	16,00	99,99
15	0,00	0,01	16,00	100,00

* A linha vermelha é o limite do número de componentes que serão usados na AF

Tabela 4. Cargas fatoriais para AF com 6 fatores e 16 variáveis na camada de 0 a 15 cm.

Variável	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5	Fator 6
PRODrn	0,032	-0,821	0,029	-0,101	0,362	0,207
CEa	-0,003	0,908	-0,163	-0,191	0,026	0,186
Elevação	0,801	-0,072	-0,258	0,285	0,329	-0,011
P	-0,096	-0,154	-0,084	0,916	0,157	-0,131
V%	0,869	0,166	0,009	-0,043	-0,060	0,438
Argila	-0,216	0,811	0,179	-0,275	0,284	-0,029
Areia	0,009	0,066	0,068	-0,101	-0,943	-0,050
pH	0,934	-0,006	0,136	-0,007	0,009	0,111
Al	-0,810	0,036	0,044	0,141	0,205	-0,234
Mg	0,519	-0,152	-0,024	0,151	0,103	0,799
CTC	0,246	-0,096	-0,127	0,017	0,015	0,889
CEss	0,094	0,017	0,231	0,821	-0,037	0,266
θg	-0,050	0,223	-0,949	-0,074	0,066	-0,138
Ds	0,233	0,884	0,255	0,079	-0,090	-0,248
Pt	-0,050	-0,569	-0,736	-0,162	0,124	0,249
Microporosidade	0,127	-0,201	-0,931	0,026	-0,026	0,198

*Valores em vermelho significam que a variável faz parte do referido Fator.

Tabela 5. Comunalidades para AF com 6 fatores e 16 variáveis na camada de 0 a 15 cm.

Variável	Comunalidades acumuladas					
	1 Fator	2 Fatores	3 Fatores	4 Fatores	5 Fatores	6 Fatores
PRODrn	0,001	0,675	0,675	0,686	0,817	0,860
CEa	0,000	0,825	0,851	0,888	0,888	0,923
Elevação	0,642	0,648	0,714	0,795	0,904	0,904
P	0,009	0,033	0,040	0,879	0,904	0,921
V%	0,755	0,782	0,782	0,784	0,788	0,979
Argila	0,047	0,705	0,737	0,813	0,894	0,895
Areia	0,000	0,004	0,009	0,019	0,908	0,911
pH	0,872	0,872	0,890	0,891	0,891	0,903
Al	0,656	0,657	0,659	0,679	0,721	0,775
Mg	0,269	0,292	0,293	0,316	0,326	0,964
CTC	0,061	0,070	0,086	0,086	0,087	0,876
CEss	0,009	0,009	0,063	0,737	0,738	0,809
θ_g	0,003	0,052	0,953	0,958	0,963	0,982
Ds	0,054	0,837	0,901	0,908	0,916	0,977
Pt	0,002	0,326	0,868	0,894	0,910	0,972
Microporosidade	0,016	0,056	0,924	0,925	0,925	0,964

Os fatores foram passíveis de interpretabilidade e assim foram renomeados de acordo com suas variáveis características, sendo os mais relevantes os fatores 1, 2 3 e 4 (representam 70 % da variância acumulada). O Fator 1 é o fator da acidez do solo. Nele, as variáveis Elevação, V% e pH se relacionam diretamente entre si e essas três se relacionam inversamente com a variável Al.

O Fator 2 é o fator da restrição do potencial produtivo. Nele, as variáveis CEa, Argila e Ds se relacionam diretamente entre si e essas três se relacionam inversamente com a variável PRODrn. Kramer et al. (2013), investigando as causas físicas de restrição da produtividade em uma lavoura comercial da mesma região, encontrou a mesma relação entre a densidade do solo na camada superficial (0 a 10 cm) e a produtividade histórica das culturas. Gruhn et al. (2012), investigando a relação entre produtividade, CEa e atributos químicos e físicos do solo, encontraram relações diferentes entre esses atributos, sendo que teor de argila, produtividade e CEa apresentaram relação diretamente proporcional. No entanto, os teores de argila encontrados na área de estudo desses autores, foram inferiores a 450 g kg⁻¹. Portanto, a presença de argila confere ao solo uma maior capacidade de armazenar umidade, sendo benéfica para a produtividade das culturas. Já para os solos da região da área desse trabalho, em que são encontrados teores de argila mais elevados, em torno de 650 a 800 g kg⁻¹, o aumento dos teores de argila não foi favorável à produtividade das culturas. Teores de argila muito elevados costumam conferir ao solo maior potencial de compactação em função do intenso tráfego de máquinas. A relação diretamente proporcional entre a argila e a

densidade do solo comprova esse fato, quanto maiores os teores de argila, maior é o potencial de compactação (SILVA et al., 2002), assim, maior é a densidade do solo e por fim, menor o potencial produtivo das culturas. Ou seja, o sensor de condutividade elétrica aparente continuou detectando teores de argila no solo, mas nesse caso, a presença desse atributo não é vantajosa para a produtividade das culturas, o que explica a relação inversa entre a CEa e a produtividade das culturas.

O Fator 3 é o fator da umidade do solo. Nele, as variáveis θ_g , Pt e Microporosidade se relacionam diretamente entre si. Esse fato comprova mais uma vez, que a condutividade elétrica é mais influenciada pela ausência de espaços porosos do que pela presença de umidade do solo, sendo que as variáveis relativas à umidade foram classificadas em um fator diferente ao da CEa. Gimenez (2013) trabalhando com a influência de atributos químicos e físicos na CEa, encontrou a mesma relação, sendo a ausência de espaços porosos maiores (macroporos) mais relacionada com a CEa do que a umidade e a granulometria, encontrando inclusive ausência de relação entre CEa e argila e CEa e umidade. Segundo o mesmo autor, a presença de espaços porosos menores (microporos) são mais relacionados com a passagem da corrente, sendo que são favoráveis à formação de caminhos contínuos de água. Mesmo não sendo classificada em nenhum fator, a Macroporosidade apresentou relação inversa e significativa com a CEa (ANEXO 1).

O Fator 4 é o fator do fósforo e da condutividade elétrica da solução do solo, sendo que essas variáveis se relacionam diretamente.

5.5.2. Relação entre os atributos do solo, produtividade e CEa na camada de 15 a 25 cm

A estatística descritiva dos atributos químicos e físicos obtidos na camada intermediária do solo (Tabela 6) demonstra que de maneira geral, os atributos estão com valores de CV % médios, altos e muito altos.

A matriz de correlação das variáveis para a camada de 15 a 25 cm indicou que apenas duas não satisfizeram a necessidade de correlação mínima com alguma outra variável, sendo elas (declividade e elevação) removidas. Quanto à premissa de não poder haver multicolinearidade nas variáveis, 15 remoções tiveram de ser feitas, sendo elas produtividade da cultura do milho, produtividade da cultura do feijão, Dr, RPa, Silte, SB, pH, V%, θ_v , PDMatriz, CAMatriz, CAAt, CC/Pt, CAAt/Pt e CC.

Tabela 6. Estatística descritiva para os atributos químicos e físicos para a camada de 15 a 25 cm.

Atributo/Propriedade	Unidade	Mín	Máx	Média	Desv. Pad	CV%
P	mg dm ⁻³	3,00	5,00	3,75	0,77	20,66
MO	g dm ⁻³	29,00	49,00	36,56	5,73	15,66
V%	%	21,00	78,00	43,75	15,20	34,74
pH	-	4,70	5,90	5,03	0,32	6,31
H+Al	cmol _c dm ⁻³	2,20	7,70	5,14	1,51	29,47
Al	cmol _c dm ⁻³	0,00	0,58	0,19	0,18	95,27
K	cmol _c dm ⁻³	0,09	0,43	0,19	0,09	47,09
Ca	cmol _c dm ⁻³	1,50	5,70	2,75	1,15	41,84
Mg	cmol _c dm ⁻³	0,30	2,10	1,09	0,48	43,97
SB	cmol _c dm ⁻³	2,08	8,03	4,03	1,61	39,94
CTC	cmol _c dm ⁻³	6,59	10,26	9,17	0,97	10,55
S	mg dm ⁻³	8,00	168,00	52,69	54,46	103,37
CEss	dS m ⁻¹	0,03	0,07	0,05	0,01	26,04
RPc	kPa	776,85	1566,05	1261,30	181,83	14,42
RPa	kPa	809,71	1567,21	1254,93	178,74	14,24
Argila	g dm ⁻³	567,00	763,00	708,44	49,95	7,05
Silte	g dm ⁻³	168,00	367,00	220,69	52,40	23,74
Areia	g dm ⁻³	46,00	101,00	70,88	15,68	22,12
θe	%	44,75	67,75	47,97	5,64	11,76
θg	g g ⁻¹	0,48	0,56	0,51	0,02	3,82
θv	g cm ⁻³	0,41	0,60	0,47	0,04	9,35
Ds	g cm ⁻³	0,94	1,21	1,11	0,08	6,93
Dr	%	75,73	97,94	89,46	6,20	6,93
Macroporosidade	%	3,11	6,35	4,56	1,00	21,85
Pt	%	55,67	62,78	58,34	1,64	2,80
Microporosidade	%	51,61	58,69	53,79	1,66	3,08
CC	%	50,67	57,17	52,67	1,56	2,97
PDMacro	%	1,32	3,07	2,02	0,44	21,98
PDMatriz	%	53,89	61,17	56,32	1,74	3,09
CAMatriz	%	2,02	5,90	3,66	1,12	30,53
CAt	%	3,84	7,80	5,68	1,19	20,94
CC/Pt	-	0,87	0,93	0,90	0,02	2,12
CAt/Pt	-	0,07	0,13	0,10	0,02	19,73

Sendo assim, das 39 variáveis iniciais apenas 22 foram selecionadas para a realização da extração de fatores pela análise de componentes principais (ACP). Dessas 22, foram retiradas da análise outras 4 variáveis, que não atenderam os critérios mínimos estabelecidos de carga fatorial e comunalidade, sendo Areia, P, CEss e PDMacro. Ao final foram definidos 5 fatores para explicar 18 variáveis (Tabela 7), atendendo os critérios das cargas fatoriais (Tabela 8) e das comunalidades (Tabela 9).

Tabela 7. Autovalores para os 15 fatores formados e linha de corte para 18 variáveis na camada de 15 a 25 cm.

Componente	Autovalor	Variância total da Componente (%)	Autovalor Cumulativo	Variância acumulada (%)
1	6,81	37,83	6,81	37,83
2	3,88	21,53	10,68	59,36
3	2,84	15,78	13,53	75,14
4	1,39	7,74	14,92	82,88
5	1,11	6,17	16,03	89,05
6	0,80	4,45	16,83	93,50
7	0,43	2,37	17,26	95,87
8	0,27	1,52	17,53	97,39
9	0,14	0,77	17,67	98,16
10	0,12	0,69	17,79	98,85
11	0,08	0,46	17,88	99,31
12	0,07	0,40	17,95	99,70
13	0,03	0,17	17,98	99,87
14	0,02	0,11	18,00	99,98
15	0,00	0,02	18,00	100,00

* A linha vermelha é o limite do número de componentes que serão usados na AF

Tabela 8. Cargas fatoriais para AF com 5 fatores e 18 variáveis na camada de 15 a 25 cm.

Variável	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5
PRODrn	0,936	0,035	0,009	0,120	0,079
CEa	-0,751	-0,225	-0,266	0,111	0,237
RPc	-0,090	-0,097	-0,112	-0,910	0,070
MO	0,768	0,036	0,370	-0,064	0,141
Argila	-0,427	-0,040	-0,763	0,256	0,036
H+Al	0,246	0,911	0,127	0,171	-0,044
Al	0,215	0,900	-0,142	0,195	-0,143
K	0,203	-0,147	0,146	-0,172	0,911
Ca	0,223	-0,942	-0,018	0,120	0,092
Mg	0,181	-0,903	-0,172	0,200	-0,076
CTC	0,760	-0,157	0,105	0,494	0,086
S	0,387	0,746	0,285	0,130	-0,210
θe	0,274	0,398	0,830	0,033	0,087
θg	-0,140	0,029	0,861	0,262	0,328
Ds	-0,851	-0,107	-0,425	-0,098	0,142
Macroporosidade	0,509	0,118	-0,250	-0,175	-0,712
Pt	0,500	0,064	0,770	0,032	-0,192
Microporosidade	0,189	-0,008	0,912	0,137	0,238

*Valores em vermelho significam que a variável faz parte do referido Fator.

Tabela 9. Comunalidades para AF com 5 fatores e 18 variáveis camada de 15 a 25 cm.

Variável	Comunalidades acumuladas				
	1 Fator	2 Fatores	3 Fatores	4 Fatores	5 Fatores
PRODrn	0,877	0,878	0,878	0,893	0,899
CEa	0,564	0,615	0,685	0,698	0,754
RPc	0,008	0,018	0,030	0,858	0,863
MO	0,590	0,591	0,728	0,732	0,752
Argila	0,182	0,184	0,766	0,832	0,833
H+Al	0,061	0,891	0,907	0,936	0,938
Al	0,046	0,857	0,877	0,915	0,936
K	0,041	0,063	0,084	0,114	0,943
Ca	0,050	0,937	0,937	0,952	0,960
Mg	0,033	0,848	0,878	0,918	0,923
CTC	0,577	0,602	0,613	0,857	0,865
S	0,150	0,706	0,787	0,804	0,848
θ_e	0,075	0,234	0,922	0,923	0,930
θ_g	0,019	0,020	0,761	0,829	0,937
Ds	0,725	0,736	0,917	0,927	0,947
Macroporosidade	0,259	0,273	0,335	0,365	0,873
Pt	0,250	0,254	0,847	0,848	0,885
Microporosidade	0,036	0,036	0,867	0,885	0,942

Os fatores foram passíveis de interpretabilidade e assim foram renomeados de acordo com suas variáveis características, sendo os mais relevantes os fatores 1, 2 e 3 (representam 70 % da variância acumulada). O Fator 1 é o fator da restrição do potencial produtivo. Nele, as variáveis CEa e Ds se relacionam diretamente entre si e essas duas se relacionam inversamente com as variáveis PRODrn, MO e CTC, as quais se relacionam diretamente entre si. Em relação aos resultados da primeira camada, nesse caso a granulometria não está presente. No entanto, passou a fazer parte do fator a MO, que assim como a argila é um atributo altamente relacionado com o potencial de compactação do solo, atuando de maneira a diminuir esse potencial estando, portanto, relacionada diretamente com a produtividade das culturas e inversamente com a CEa. Ou seja, a qualidade da estrutura física do solo novamente se relacionou diretamente com a produtividade das culturas e inversamente com a CEa.

O Fator 2 é o fator da acidez do solo. Nele, as variáveis H+Al, Al e S se relacionam diretamente entre si e essas três se relacionam inversamente com as variáveis Ca e Mg, as quais se relacionam diretamente entre si. Novamente as cargas positivas não se relacionaram com a CEa.

O Fator 3 é o fator da umidade do solo. Nele, as variáveis θ_e , θ_g , Pt e Microporosidade se relacionam diretamente entre si e essas quatro se relacionam

inversamente com a variável Argila. Nesse caso, a argila que deveria ser responsável pela capacidade de armazenamento de água do solo, pelo fato de estar em quantidades excessivamente elevadas e estar favorecendo a compactação desse solo, está diminuindo esse potencial.

5.5.3. Relação entre os atributos do solo, produtividade e CEa na camada de 25 a 40 cm

A estatística descritiva dos atributos químicos e físicos obtidos na camada mais profunda do solo (Tabela 10) demonstra que de maneira geral, os atributos estão com valores de CV % médios, altos e muito altos.

A matriz de correlação das variáveis para a camada de 25 a 40 cm indicou que todas satisfizeram a necessidade de correlação de pelo menos 0,3 com alguma outra variável, de tal forma que nenhuma variável teve que ser removida enquanto 14 remoções tiveram de ser feitas devido haver multicolinearidade nas variáveis, sendo elas produtividade da cultura do milho, produtividade da cultura do feijão, Dr, RPa, Silte, SB, V%, θ_v , PDMatriz, CAMatriz, CA_t, CC/Pt, CA_t/Pt e CC.

Tabela 10. Estatística descritiva para os atributos químicos e físicos para a camada de 25 a 40 cm.

Atributo/Propriedade	Unidade	Mín	Máx	Média	Desv. Pad	CV%
P	mg dm ⁻³	3,00	4,00	3,27	0,46	14,01
MO	g dm ⁻³	23,00	34,00	28,47	3,64	12,80
V%	%	21,00	63,00	33,93	11,24	33,13
pH	-	4,60	5,70	4,97	0,28	5,57
H+Al	cmol _c dm ⁻³	3,00	6,90	4,80	1,14	23,75
Al	cmol _c dm ⁻³	0,00	0,59	0,23	0,20	85,59
K	cmol _c dm ⁻³	0,06	0,28	0,11	0,06	58,21
Ca	cmol _c dm ⁻³	0,80	3,40	1,55	0,70	45,25
Mg	cmol _c dm ⁻³	0,40	1,60	0,83	0,32	38,92
SB	cmol _c dm ⁻³	1,36	5,18	2,48	1,02	41,11
CTC	cmol _c dm ⁻³	5,15	9,22	7,28	1,21	16,56
S	mg dm ⁻³	14,00	199,00	111,40	67,06	60,20
CEss	dS m ⁻¹	0,03	0,07	0,05	0,01	23,13
RPc	kPa	966,80	1763,39	1341,69	259,24	19,32
RPa	kPa	957,33	1747,83	1382,32	273,18	19,76
Argila	g dm ⁻³	676,00	778,00	721,33	33,25	4,61
Silte	g dm ⁻³	168,00	250,00	211,60	29,01	13,71
Areia	g dm ⁻³	41,00	97,00	67,07	16,66	24,84
θ _e	%	46,85	54,25	48,74	2,03	4,17
θ _g	g g ⁻¹	0,49	0,54	0,52	0,02	3,07
θ _v	g cm ⁻³	0,43	0,57	0,49	0,04	8,18
D _s	g cm ⁻³	0,95	1,19	1,07	0,09	8,02
D _r	%	75,05	94,27	85,07	6,83	8,02
Macroporosidade	%	3,11	7,50	5,12	1,30	25,33
Pt	%	56,50	62,10	59,32	1,66	2,79
Microporosidade	%	52,31	57,73	54,20	1,50	2,77
CC	%	50,52	56,24	52,87	1,58	2,99
PDMacro	%	1,12	3,10	2,04	0,56	27,33
PDMatriz	%	54,74	60,19	57,28	1,70	2,97
CAMatriz	%	2,20	7,96	4,41	1,79	40,62
CAt	%	4,05	9,68	6,45	1,82	28,19
CC/Pt	-	0,84	0,93	0,89	0,03	3,21
CAt/Pt	-	0,07	0,16	0,11	0,03	26,48

Sendo assim, das 39 variáveis iniciais apenas 25 foram selecionadas para a realização da extração de fatores pela análise de componentes principais (ACP).

Dessas 25, foram retiradas da análise outras 10 variáveis, que não atenderam os critérios mínimos estabelecidos de carga fatorial e comunalidade, sendo elas declividade, P, Areia, K, Ca, CTC, PDMacro, Mg, S e elevação. Ao final foram definidos 5 fatores para explicar 15 variáveis (Tabela 11), atendendo os critérios das cargas fatoriais (Tabela 12) e das

comunalidades (Tabela 13).

Tabela 11. Autovalores para os 13 fatores formados e linha de corte para 15 variáveis na camada de 25 a 40 cm.

Componente	Autovalor	Variância total da Componente (%)	Autovalor Cumulativo	Variância acumulada (%)
1	5,96	39,74	5,96	39,74
2	3,41	22,70	9,37	62,44
3	1,96	13,08	11,33	75,52
4	1,49	9,94	12,82	85,46
5	1,06	7,10	13,88	92,55
6	0,41	2,77	14,30	95,32
7	0,27	1,80	14,57	97,12
8	0,16	1,08	14,73	98,20
9	0,15	0,99	14,88	99,19
10	0,06	0,37	14,93	99,56
11	0,04	0,25	14,97	99,81
12	0,02	0,11	14,99	99,92
13	0,01	0,08	15,00	100,00

* A linha vermelha é o limite do número de componentes que serão usados na AF

Tabela 12. Cargas fatoriais para AF com 5 fatores e 15 variáveis na camada de 25 a 40 cm.

Variável	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5
PRODrn	0,895	-0,006	-0,022	0,116	0,281
CEa	-0,741	-0,270	-0,372	0,306	0,147
RPC	-0,878	0,108	0,108	0,130	-0,172
MO	0,721	0,153	0,246	-0,368	0,261
Areia	-0,203	-0,088	0,061	0,097	-0,951
pH	0,198	-0,963	0,063	-0,004	-0,031
H+Al	0,379	0,903	0,034	0,083	0,137
Al	0,084	0,918	-0,076	0,222	0,015
Ca	0,524	-0,714	0,168	0,337	0,052
CTC	0,815	0,256	0,112	0,412	0,184
θ_e	0,142	-0,143	-0,031	-0,939	0,103
θ_g	-0,209	0,125	-0,928	-0,023	0,098
Ds	-0,966	0,095	0,076	0,073	-0,064
Pt	0,896	-0,136	-0,287	-0,102	-0,200
Microporosidade	0,456	0,077	-0,875	-0,022	-0,053

*Valores em vermelho significam que a variável faz parte do referido Fator.

Tabela 13. Comunalidades para AF com 5 fatores e 15 variáveis na camada de 25 a 40 cm.

Variável	Comunalidades acumuladas				
	1 Fator	2 Fatores	3 Fatores	4 Fatores	5 Fatores
PRODrn	0,801	0,801	0,801	0,815	0,893
CEa	0,549	0,622	0,760	0,854	0,875
RPc	0,771	0,783	0,794	0,811	0,841
MO	0,520	0,544	0,604	0,740	0,808
Areia	0,041	0,049	0,053	0,062	0,967
pH	0,039	0,967	0,971	0,971	0,972
H+Al	0,144	0,958	0,959	0,966	0,985
Al	0,007	0,851	0,856	0,905	0,906
Ca	0,275	0,784	0,813	0,926	0,929
CTC	0,665	0,731	0,743	0,913	0,947
θ_e	0,020	0,041	0,041	0,924	0,935
θ_g	0,044	0,059	0,921	0,921	0,931
Ds	0,934	0,943	0,949	0,954	0,958
Pt	0,802	0,820	0,903	0,913	0,953
Microporosidade	0,208	0,214	0,980	0,981	0,984

Os fatores foram passíveis de interpretabilidade e assim foram renomeados de acordo com suas variáveis características, sendo os mais relevantes os fatores 1, 2 e 3 (representam 70 % da variância acumulada). O Fator 1 é o fator da restrição do potencial produtivo. Nele, as variáveis CEa, RPc e Ds se relacionam diretamente entre si e essas três se relacionam inversamente com as variáveis PRODrn, MO, CTC e Pt, as quais se relacionam diretamente entre si. Mais uma vez os resultados foram muito parecidos em relação às duas camadas anteriores. A presença do fator que ameniza o potencial de compactação (MO), proporciona uma melhor qualidade da estrutura física do solo, diminuindo a compactação, nesse caso a densidade e a resistência à penetração, propiciando uma maior porosidade total (Pt), estando relacionada diretamente com a produtividade das culturas e inversamente com a CEa. A CTC do solo no caso está contribuindo apenas para a maior produtividade das culturas, já que para a CEa o resultado foi o contrário do esperado.

O Fator 2 é o fator da acidez do solo. Nele, as variáveis H+Al e Al se relacionam diretamente entre si e essas duas se relacionam inversamente com as variáveis pH e Ca, as quais se relacionam diretamente entre si.

O Fator 3 é o fator da umidade do solo. Nele, as variáveis θ_g e microporosidade se relacionam diretamente entre si.

Na figura 15 são apresentadas as médias dos atributos mais relevantes coletados na mesma classe de PRODrn para as três camadas de coleta.

O comportamento da Ds (Figura 15e) também corrobora com o que ocorreu na análise de fatores. O atributo de Ds apareceu em todas as camadas no mesmo fator que a PRODrn e a

CEa. Kramer et al. (2013) encontrou valores de Ds semelhantes investigando as camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm em um solo da mesma região, sendo que esse atributo também apresentava restrição à produtividade das culturas no valor de $1,13 \text{ g dm}^{-3}$, valor aproximado que se encontra a Ds na classe de potencial produtivo média baixa.

Os valores de Dr (Figura 15f) são preocupantes, chegando quase a 96 % na classe com menor potencial produtivo. Segundo Klein (2012) a Dr ideal está em torno de 80 a 90 %. Abaixo de 80 % o solo apresenta excesso de porosidade. Entre 90 e 95 % o solo está compactado, e acima de 95 % muito compactado. Esses valores influenciam diretamente na Pt (Figura 15h). Tanto a Dr como a Pt estão bastante relacionados com a PRODrn, mesmo a Pt estando em fatores diferentes da PRODrn nas camadas de 0 a 15 e 15 a 25 cm.

Os valores médios de MO também são crescentes de acordo com a classe de potencial produtivo nas 3 camadas avaliadas (Figura 15a). Provavelmente pelo fato de sempre produzir menos massa radicular e menor resíduo de parte aérea das plantas cultivadas, é incorporada menor quantidade de MO também.

P (Figura 15j) e K (Figura 15i) apresentaram tendência de permanecerem retidos na camada superficial do solo, diminuindo em profundidade. Os mesmos resultados foram encontrados por Kramer et al. (2013), investigando as camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm em um solo da mesma região. Trabalhos de mostram que o maior teor de P na camada de superfície em SPD ocorre pela não incorporação dos fertilizantes adicionados na superfície, às menores perdas por erosão e, também, pela reciclagem proporcionada pelas plantas, as quais absorvem o P disponível de camadas mais profundas, deixando-o na superfície, quando da decomposição dos seus resíduos (COSTA, 2008; RHEINHEIMER & ANGHINONI, 2001).

Os teores de S (Figura 15d) indicam que esse nutriente tende a se acumular na camada inferior do perfil do solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Pessoni (2012), em que trabalhando com solo de textura arenosa/argilosa, verificou o mesmo comportamento entre a camada de 0 a 20 e 20 a 40 cm. Mesmo esse nutriente estando com o maior teor na classe com maior potencial produtivo, em nenhuma camada ficou no mesmo fator que a PRODrn, não se relacionando nem com a produtividade nem com a CEa.

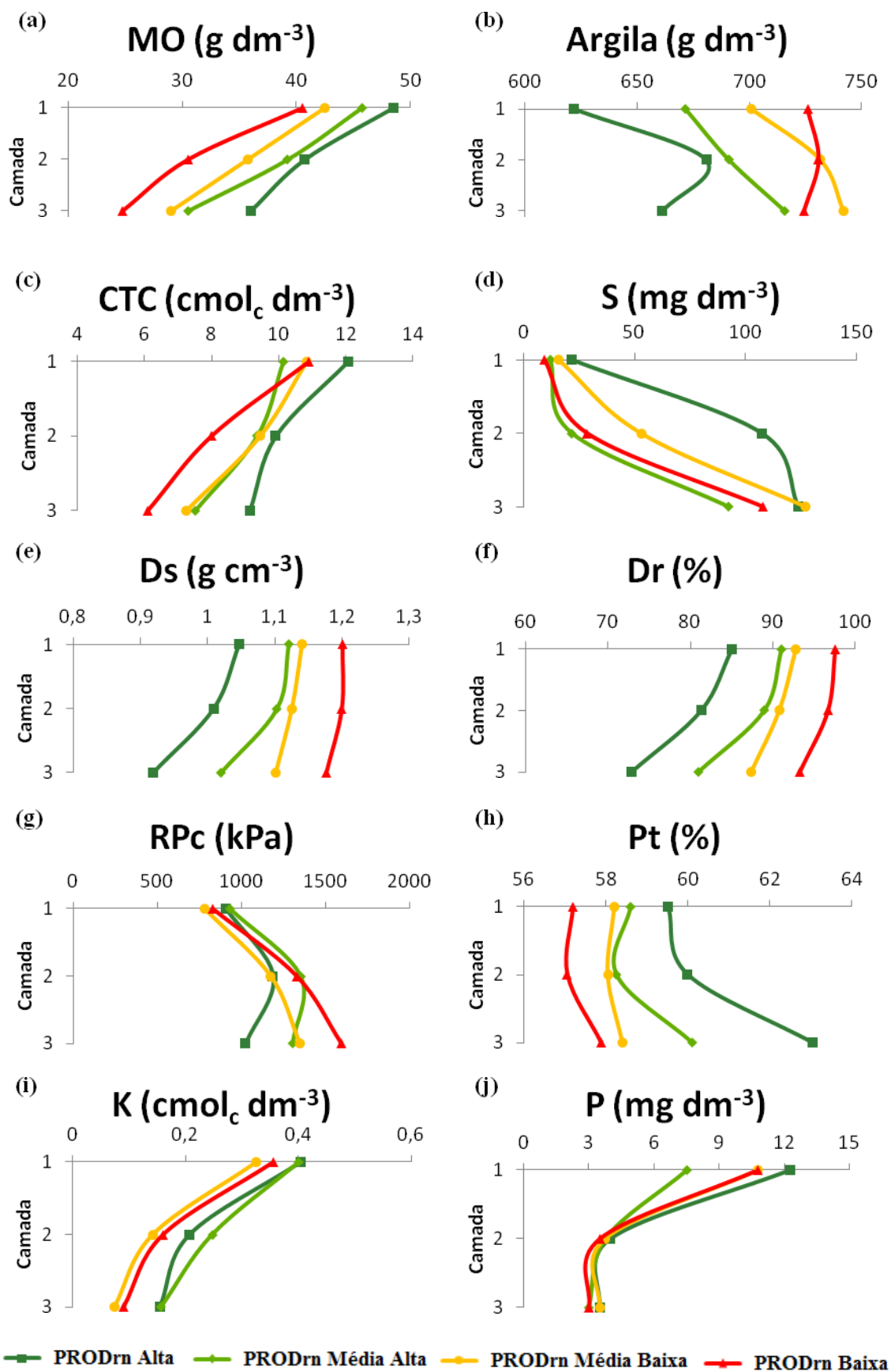


Figura 15. Médias dos atributos mais relevantes coletados na mesma classe de PRODrn para as três camadas de coleta.

O comportamento da CTC (Figura 15c) corrobora com o que ocorreu na análise de fatores, sendo que a CTC apenas se relacionou com PRODrn nas camadas de 15 a 25 e de 25 a 40 cm. Provavelmente na camada de 0 a 15 cm os teores médios de MO ainda conferem uma CTC satisfatória às classe de PRODrn média baixa e baixa. Como a CTC se relacionou de modo inverso com os teores de argila, é possível se inferir que a CTC nesse caso é proveniente em maior parte pela presença da MO no solo.

O comportamento da RPC (Figura 15g) também corrobora com o que ocorreu na análise de fatores, sendo que a RPC apenas se relacionou com PRODrn na camada de 25 a 40 cm.

6. CONCLUSÕES

Nas três camadas avaliadas, os atributos responsáveis pela qualidade da estrutura física do solo, como baixa densidade do solo e alta porosidade do solo foram os que mais se relacionaram e beneficiaram a produtividade das culturas. Nas camadas intermediária e mais profunda, a CTC e o teor de matéria orgânica também se relacionaram de modo benéfico com a produtividade das culturas.

Nas três camadas avaliadas, os atributos responsáveis pela qualidade da estrutura física do solo, principalmente os relacionados com a porosidade, foram os que mais se relacionaram com a condutividade elétrica aparente, de modo a limitar a passagem da corrente elétrica e consequentemente proporcionar valores menores de condutividade.

A produtividade das culturas e a condutividade elétrica aparente se apresentaram inversamente relacionadas para as condições de solo dessa área.

Da mesma forma, o uso da estatística multivariada, mais especificamente a análise de fatores (AF), se mostrou um método adequado para descrever e facilitar o entendimento do comportamento e da variabilidade dos dados.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho poderá contribuir para o desenvolvimento da agricultura de precisão na região centro-oeste do estado do Paraná, sendo que pela primeira vez foi caracterizada a condutividade elétrica aparente (CEa) do solo dessa região. O uso da CEa se mostra como uma alternativa de levantamento da qualidade física do solo e consequentemente para a inferência do potencial produtivo da área, desde que se tenha ciência da necessidade de um

levantamento auxiliar dos atributos físicos em cada área comercial, já que a CEa poderá se relacionar diretamente ou inversamente com o potencial produtivo das lavouras comerciais, dependendo da textura do solo.

De maneira geral, os atributos físicos do solo se mostraram mais restritivos ao potencial produtivo dessa área de estudo. Isso provavelmente se deve ao fato de a fertilidade química do solo estar sendo trabalhada há mais tempo na área.

O fato de ter realizado as análises químicas do solo em camadas visando os atributos físicos, impossibilitou a análise comparativa com níveis de teores críticos dos nutrientes no solo, os quais são calibrados para as camadas de 0 a 20 e de 20 a 40 cm para a região.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMCHUK, V.I.; HUMMEL, J.W.; MORGAN, M.T.; UPADHYAYA, S.K. On-the go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**. Amsterdam, v.44, p.71-91, 2004.

ALLRED, B.J.; GROOM, D.; EHSANI, R.M.; DANIELS, J.J.; Resistivity methods. In: BALLRED, B.; JEFFREY, D.; EHSANI, R.M. (Ed.). **Handbook of agricultural geophysics**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008. chap. 4, p. 85-108.

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; SUZUKI, L. E. A. S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.617-625, 2007.

AMADO, T.J.C.; NICOLOSO, R.; LANZANOVA, M.; SANTI, A.L.; LOVATO, T. A compactação pode comprometer os rendimentos de áreas sob plantio direto. **Revista Plantio Direto**, n.89, p.34-42, 2005.

AMADO, T.J.C.; PONTELLI, C.B.; SANTI, A.L.; VIANA, J.H.M.; SULZBACH, L.A.S. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.8, p.1101-1110, 2007.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 337-345, 2004.

BASSO, B.; FIORENTINO, C.; D'ERRICO, A.; CAMMARANO, D. Understanding Spatial and Temporal Variability of Wheat Yield: an integrated system approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 11., Indianápolis, **Proceedings**. 2012.

BECEGATO, V.A. **Aplicação de técnicas geofísicas e geoquímicas em duas glebas agrícolas do noroeste do estado do Paraná e suas relações com fertilizantes fosfatados**. 2005. 198 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

BESSON, A.; COUSIN, I.; SAMOUËLIAN, A.; BOIZARD, H.; RICHARD, G.; Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.79, p.1239-249, May 2004.

BESSON, A.; COUSIN, I.; BOURENNANE, H.; NICOLLAUD, C.; PASQUIER, C.; RICHARD, G. The spatial and temporal organization of soil water at the field scale as described by electrical resistivity measurements. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v. 61, p. 120-132, Aug. 2010.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO; I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na Região dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.167-177, 2001.

BLACKMORE, B.S.; GODWIN, R.J.; FOUNTAS, S. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years. **Biosystems Engineering**, v.84, p.455-466, 2003.

BLAINSKI, É.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.975-983, 2008.

BONO, J. A. M. **Alterações em propriedades físicas de um Latossolo da Região Sudoeste dos Cerrados por diferentes sistemas de uso e manejo**. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2007, 82p. Tese (Doutorado em Agronomia).

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.4, p.605-614, 2006.

BREVIK, E.C; FENTON, T.E. Soil sensing techniques as soil survey tools in lacustrine-derived soils, central Iowa (compact disc). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., Bloomington, 2000. **Proceedings**. Bloomington: ASA;CSSA;SSSA, 2000.

BURGUENÑO, H. La fertirrigación en cultivos hortícolas com acolchado plástico. Culiacán: BURSAR, 1996. v.1, 45p.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, Instituto Agronômico, 2009. 77 p. (Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada)

CHRISTY, C.D.; LUND, E.D. Using electrical conductivity to provide answers for precision farming (compact disc). In: INTERNATIONAL CONFERENCE GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 1., Orlando, 1998. **Proceedings**. Orlando: s. ed., 1998. 8p.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.11, p.1663-1674, 2006.

- CORWIN, D.L.; LESCH, S.M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v.46, p.11-43, 2005.
- COSTA, S.E.V.G. de A. Distribuição de fósforo, de potássio e de raízes e rendimento de milho em sistemas de manejo de solo e da adubação em longo prazo. 2008. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Mapa de solos do estado do Paraná**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2008.
- EMBRAPA. Empresa brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Conceitos de Fertilidade do Solo e Manejo Adequado para as Regiões Tropicais**; 1.ed. Dados eletrônicos; **Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite**, 2010.
- EMBRAPA. Empresa brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solo**; 2.ed. Dados eletrônicos; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2011. 230p.
- FERNANDES, F. C. S.; ALVES, M. C.; SILVA, M. M. da. Produtividade de culturas e atributos físicos de um Latossolo afetados pelo sistema de manejo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.6, n.3, p. 297-308, 2007.
- FERREIRA, M. M., DIAS JR, M. S. **Física do Solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 63 p.
- FERREIRA, M. M. M.; FERREIRA, G. B.; FONTES, P. C. R.; DANTAS, J. P. Produção de tomateiro em função de doses de nitrogênio e da adubação orgânica em duas épocas de cultivo. **Revista Horticultura Brasileira**, v.21, p.468-473, 2003.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; CECATO, U.; BARBERO, L. M.; LUGÃO, S. M. B.; COSTA, M.A.T. Qualidade física do solo em pastagem adubada e sob pastejo contínuo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.43, n.11, p.1583-1590, 2008.
- FLOYD, F. J. & WIDAMAN, K. F. Factor analysis in the development and refinement of clinical assessment instruments. **Psychological Assessment**, 7(3), 286-299. (1995).
- FRAISSE C W; SUDDUTH K; KITCHEN N R; FRIDGEN J J. Use of unsupervised clustering algorithms for delineating withinfield managementzones. ASAE, St. Joseph, MI, USA, 1999.
- FRIEDMAN, S.P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. **Computers and Electronics in Agriculture** , Amsterdam, v. 46, p. 45-70, Sept. 2005.
- FUKUE, M.; MINATO, T.; HORIBE, H.; TAYA, N. The micro-structures of clay given by resistivity measurements. **Engineering Geology**, Amsterdam, v. 54, p. 43-53, 1999.
- GIMENEZ, L.M. **Relação da condutividade elétrica aparente com algumas propriedades físico-hídricas e com a variabilidade espacial dos solos**. 2013. 120 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- GIRARDI, E. P.; **Proposição de uma cartografia geográfica crítica e sua aplicação no desenvolvimento do atlas da questão agrária brasileira**. Presidente Prudente – FCT, Tese

(Doutorado), 2008.

GRUHN, E.M.; AMADO, T.J.C.; NORA, D.D.; TABALDI, F.M. Condutividade elétrica do solo avaliada por sensor e sua relação com os atributos do solo e produtividade do milho. **Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão (ConBAP)**. Ribeirão Preto - SP. Anais. 2012

HARTSOCK, N.J.; MUELLER, T.G.; THOMAS, G.W.; BARNHISEL, R.I.; WELLS, K.L.; SHEARER, S.A. Soil electrical conductivity variability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000 Minneapolis. **Proceedings...** Madison: American Society of Agronomy, 2000. 1 CD-ROM.

HEINIGER, R.W.; MCBRIDE, R.G.; CLAY, D.E. Using soil electrical conductivity to improve nutrient management. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 508-519, Nov. 2003.

IAPAR . Instituto Agrônômico do Paraná. **Cartas Climáticas do Paraná**. Versão 1.0. 2000. (formato digital) 1 CD.

KAMINSKI, J. Acidez do solo e a fisiologia das plantas. In: KAMINSKI, J.; VOLKWEISS, J. & BECKER, F.C. SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO, 2., Santa Maria, 1989. Seminário... Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1989. p.39-61.

KHAN, F.S.; ZAMAN, Q.U.; FAROOQUE, A.A.; SALEEM, S.R.; SCHUMANN, A.W.; MADANI, A.; PERCIVAL, D.C. Relationship of soil properties to apparent ground conductivity in wild blueberry fields. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 11., Indianápolis, **Proceedings**. 2012.

KING, J.A.; DAMPNEY, P.M.R.; LARK, M.; MAYR, T.R.; BRADLEY, R.I. Sensing soil spatial variability by electromagnetic induction (EMI): it's potencial in precision farming (compact disc). In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., Montpellier, 2001, **Proceedings**. Montpellier: Ecole Nationale Supérieure Agronomique, 2001.

KLEIN, V.A. **Física do solo**. 2.ed. Passo Fundo. Ed. Universidade de Passo Fundo, 2012. 240p.

KRAMER, L.F.M.; MÜLLER, M.M.L.; TORMENA, C.A.; MICHALOVICZ, L.; NASCIMENTO, R.; VICENSI, M. Wheat yield and physical properties of a Brown latosol under no-tillage in south-central Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 37:1216-1225, 2013.

LARK R M; STAFFORD J V. Consistency and change in spatial variability of crop yield over successive seasons: methods of data analysis. In: 3rd International Conference on Precision Agriculture (Robert PC; Rust RH; Larson W E, eds), pp 141–150. ASA, CSSA, SSSA & ASAE, Madison, Wisconsin, USA, 1996.

LARSCHEID G; BLACKMORE B S. Interactions between farm managers and information systems with respect to yield mapping. In: 3rd International Conference on Precision Agriculture (Robert P C; Rust R H; Larson W E, eds), pp 1153–1163. (1996) ASA, CSSA, SSSA & ASAE.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LÜCK, E.; GEBBERS, R.; RUEHLMANN, J.; SPRANGENBERG, U. Electrical conductivity mapping for precision farming. **Near Surface Geophysics**, Utrecht, v. 7, p. 15-25, Nov. 2009.

LUKAS, V.; NEUDERT, L.; KREN, J. Mapping of soil conditions in precision agriculture. **Acta Agrophysica**, Berlin, v. 13, p. 393-405, Feb. 2009.

LUND, E.D.; COLIN, P.E.; CHRISTY, D.; DRUMMOND, P.E. Applying soil electrical conductivity technology to precision agriculture (compact disc). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., St. Paul, 1998, **Proceedings**. St. Paul: ASA;CSSA;SSSA, 1998. p. 1089-1100.

LUND, E.D.; COLIN, P.E.; CHRISTY, D.; DRUMMOND, P.E. Using yield and soil electrical conductivity maps to derive crop production performance information (compact disc). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., Madison, 2000, **Proceedings**. Madison: ASA;CSSA;SSSA, 2000.

MACHADO, P.L.O.A.; BERNARDI, A.C.C.; VALENCIA, L.I.O.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.; SILVA, C.A.; ANDRADE, A.G.; MADARI, B.E.; MEIRELLES, M.S.P. Mapeamento da condutividade elétrica do solo e relação com os teores de argila de um Latossolo Vermelho sob plantio direto no Paraná. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, v.41, n.6, p.1.023-1.031, 2006

MANTOVANI, E.C. **Agricultura de precisão na Embrapa**. Brasília: [s.n.], 2006. 8p. Disponível em: http://www.ripa.com.br/fileadmin/user_upload/_temp_/Projeto_Agricultura_de_Precisao-Junho_2006.doc. Acesso em: 8 jun. 2015.

MARCOLIN, C. D. **Propriedades físicas de Nitossolo e Latossolos argilosos sob plantio direto. Passo Fundo**: Universidade de Passo Fundo, 2006. 110p. Dissertação (Mestrado em Agronomia).

MCNEILL, J.D. Electrical conductivity of soils and rocks. Mississauga: Geonics Ltd., 1980. (Technical Note, 5). Disponível em: <<http://www.geonics.com>>. Acesso em: 11 jun. 2015.

MELO, W. J. de.; MARQUES, M. O.; MELO, V. P. de; CINTRA, A. A. D. Uso de resíduos em hortaliças e impacto ambiental. **Revista Horticultura Brasileira**, v.18, p.67-81, 2000.

MILANI, L.; SOUZA, E.G. de; URIBE-OPAZO, M.A.; GABRIEL FILHO, A.; JOHANN, J.A.; PEREIRA, J.O. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.28, p.591-598, 2006.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B.; WHELAN, B.M. **Vesper version 1.6**. Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, 2002. <http://www.usyd.edu.au/su/agri/acpa>. (12 out. 2004).

MOLIN, J.P.; FAULIN, G.D.C. Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 1, p. 1-5, 2013.

MOLIN, J.P. Agricultura de precisão, parte I: o que é e estado da arte em sensoriamento.

Engenharia Agrícola, v.17, p.97-107, 1997.

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Indicadores da Acidez do Solo para Recomendação de Calagem no Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:237-247, 2008.

OGURI, G.; ANDRADE-SANCHEZ, P.; HEUN, W. Potential use of the Veris apparent EC sensor to predict soil texture under the semi-arid conditions of central Arizona. In: 2009 ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 9., 2009. **Proceedings...** St Joseph: ASABE, 2009. p. 1-8. (Paper, 096488, 2009).

PANNETON, B.; BROUILLARD, M. Use of fuzzy mapping to extract management zones from yield maps. AIC 2002. CSAE/SCGR, Mansonville, QC, Canada, 2002.

PANNETON, B.; BROUILLARD, M.; PIEKUTOWSKI, T. Integration of yield data from several years into a single map. In: 3rd European Conference on Precision Agriculture (Grenier G; Blackmore B S, eds), pp 73–78. Agro Montpellier, Montpellier, 2001.

PATIL, V. H., SINGH, S. N., MISHRA, S. & DONAVAN, D. T. Efficient theory development and factor retention criteria: Abandon the ‘eigenvalue greater than one’ criterion. **Journal of Business Research**, 61(2), 162-170. 2008.

PEREIRA, J. C. R. Análise de dados qualitativos: estratégias metodológicas para as ciências da saúde, humanas e sociais. São Paulo: Edusp, 2001.

PESSONI, P.T. Calagem e gessagem na produtividade da soja e do triticale. Instituto Agrônomo de Campinas. 2012. 93p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical).

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. São Paulo: Nobel, 1985. 467 p.

RABELLO, L.M.; INAMASU, R.Y.; TORRE NETO, A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; MOLIN, J.P. Medida **de condutividade elétrica do solo adaptada a uma plantadeira**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008. 4 p. (Circular Técnica, 46).

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. **Mecânica do solo**. In: van LIER, Q.J., ed. Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 298 p.

REICHERT, P. **Cultura do feijão e nitrogênio no sistema de integração lavoura pecuária**. Guarapuava: Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2012. 54p. Dissertação (Mestrado em Agronomia).

REIS, E. Estatística multivariada aplicada. Lisboa, 1997.

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

RHEINHEIMER, D. dos S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.151-160, 2001.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. da G. B. de F.; SAMPAIO F. de M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência Agrotécnica**, v.31, n.4, p.1167-1175, 2007.

RHOADES, J. D. Electrical conductivity methods for measuring and mapping soil salinity. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.49, p.232-242, 1993.

RHOADES, J.D.; CORWIN, D.L. Measurement of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.288-291, 1984.

RHOADES, J.D.; CORWIN, D.L. Soil electrical conductivity: effects of soil properties and application to soil salinity appraisal. **Commun Soil Science Plant Annual**, v. 21, p. 837-860, 1990.

RODRIGUES, M. S.; CORÁ, J. E.; RIENZI, E. A.; MUELLER, T. G.; CASTRIGNANÒ, A. Spatial and Temporal Variability of Corn Grain Yield as a Function of Soil Parameters, and Climate Factors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 11., Indianápolis, **Proceedings**. 2012.

SANCHEZ, E. **Propriedades físicas do solo e produtividade de soja em sucessão a plantas de cobertura de inverno**. Guarapuava: Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2012. 62p. Dissertação (Mestrado em Agronomia).

SANTI, A.L. **Relações entre indicadores de qualidade do solo e a produtividade das culturas em áreas com agricultura de precisão**. 2007. 150p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SANTOS, J. F. dos; BRITO, L. M. P; GRANGEIRO, J. I. T. ALMEIDA, F. A. C.; OLIVEIRA, M. E. C. de. Componentes de produção e rendimentos de batata-doce, em função de doses de esterco de bovino. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.8, p.75-81, 2006.

SAMOUËLIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 83, p. 173-193, Feb. 2005.

SELADJI, S.; CONSENZA, P.; TABBAGH, A.; REANGER, J.; RICHARD, G. The effect of compaction on soil electrical resistivity: a laboratory investigation. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v. 61, p. 1043-1055, Sept. 2010.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J. and 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. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, vol.26, n.1, pp.9-16, 2002

SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R.; WIEBOLD, W.J.; BATCHELOR, W.D.; BOLLERO, G.A.; BULLOCK, D.G.; CLAY, D.E.; PALM, H.L.; PIERCE, F.J.; SCHULER, R.T.; THELEN, K.D. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 46, p. 263-283,

June 2005.

VITHARANA, U.W.A.; VAN MEIRVENNE, M.; SIMPSON, D.; COCKX, L.; HOFMAN, G. Agronomic consequences of potential management zones delineated on the basis of EM38DD measurements. **Near Surface Geophysics**, Utrecht, v. 6, p. 289-296, Apr. 2008.

WERBAN, U.; KUKA, K.; MERBACH, I. Correlation of electrical conductivity and soil parameters at a long-term fertilization experiment. **Near Surface Geophysics**, Utrecht, v. 7, p. 5-14, Jan. 2009.

9. ANEXOS

	PRODrn	PROD. Feijão	PROD. Milho	CEa	Elevação	Declividade	P	MO	V%	pH	H+A	Al	K
PRODrn	1,00	0,98	0,87	-0,60	0,13	0,14	0,05	0,53	-0,04	0,12	0,10	-0,05	0,12
PROD. Feijão	0,98	1,00	0,80	-0,51	0,17	0,02	0,03	0,45	-0,03	0,11	0,07	0,02	0,10
PROD. Milho	0,87	0,80	1,00	-0,65	0,08	0,19	0,07	0,66	-0,08	0,00	0,24	-0,22	0,17
CEa	-0,60	-0,51	-0,65	1,00	-0,11	-0,41	-0,32	-0,57	0,23	0,04	-0,28	-0,04	0,15
Elevação	0,13	0,17	0,08	-0,11	1,00	-0,24	0,30	0,37	0,64	0,66	-0,63	-0,50	0,20
Declividade	0,14	0,02	0,19	-0,41	-0,24	1,00	-0,21	0,23	-0,08	0,11	0,03	-0,25	-0,20
P	0,05	0,03	0,07	-0,32	0,30	-0,21	1,00	0,39	-0,22	-0,12	0,27	0,27	0,09
MO	0,53	0,45	0,66	-0,57	0,37	0,23	0,39	1,00	0,20	0,28	-0,04	-0,29	0,50
V%	-0,04	-0,03	-0,08	0,23	0,64	-0,06	-0,22	0,20	1,00	0,88	-0,89	-0,77	0,51
pH	0,12	0,11	0,00	0,04	0,66	0,11	-0,12	0,28	0,88	1,00	-0,93	-0,71	0,31
H+A	0,10	0,07	0,24	-0,28	-0,63	0,03	0,27	-0,04	-0,89	-0,93	1,00	0,66	-0,29
Al	-0,05	0,02	-0,22	-0,04	-0,50	-0,25	0,27	-0,29	-0,77	-0,71	0,66	1,00	-0,29
K	0,12	0,10	0,17	0,15	0,20	-0,20	0,09	0,50	0,51	0,31	-0,29	-0,29	1,00
Ca	0,00	0,02	0,01	0,17	0,49	-0,13	-0,25	0,25	0,91	0,68	-0,68	-0,61	0,56
Mg	0,33	0,35	0,29	-0,01	0,55	-0,13	0,04	0,34	0,75	0,56	-0,43	-0,55	0,50
Sb	0,08	0,10	0,08	0,14	0,51	-0,14	-0,18	0,31	0,90	0,67	-0,64	-0,61	0,61
CTC	0,17	0,17	0,25	0,02	0,27	-0,16	-0,06	0,36	0,60	0,28	-0,20	-0,37	0,60
S	0,48	0,42	0,53	-0,57	-0,17	-0,10	0,54	0,26	-0,63	-0,51	0,70	0,42	-0,18
Cess	0,05	0,02	-0,04	-0,07	0,15	0,20	0,59	0,28	0,15	0,18	-0,03	-0,10	0,28
RPC	0,25	0,22	0,19	-0,19	0,18	0,37	-0,14	0,54	0,51	0,51	-0,41	-0,39	0,51
Rpa	0,40	0,36	0,40	-0,33	0,18	0,25	-0,13	0,66	0,42	0,45	-0,31	-0,36	0,49
Argila	-0,47	-0,39	-0,60	0,79	-0,24	-0,25	-0,30	-0,75	-0,10	-0,18	-0,01	0,20	-0,27
Silte	0,54	0,47	0,66	-0,80	0,30	0,23	0,34	0,83	0,09	0,18	0,04	-0,17	0,30
Areia	-0,33	-0,35	-0,26	0,06	-0,30	0,07	-0,21	-0,36	0,05	0,02	-0,11	-0,15	-0,11
(θ_e)	0,31	0,21	0,54	-0,20	-0,34	0,25	0,12	0,47	-0,23	-0,13	0,31	-0,16	0,17
(θ_g)	-0,20	-0,13	-0,05	0,35	0,16	-0,45	0,01	0,09	-0,07	-0,17	0,07	0,03	0,10
(θ_v)	0,59	0,58	0,74	-0,39	0,01	-0,12	0,12	0,55	-0,24	-0,25	0,40	0,07	0,17
Ds	-0,84	-0,79	-0,90	0,67	0,06	-0,11	-0,11	-0,57	0,25	0,20	-0,43	-0,07	-0,11
Dr	-0,84	-0,79	-0,90	0,67	0,06	-0,11	-0,11	-0,57	0,25	0,20	-0,43	-0,07	-0,11
Macro porosidade	0,59	0,54	0,62	-0,53	-0,25	0,18	-0,11	0,16	-0,36	-0,27	0,42	0,18	-0,20
Pt	0,56	0,57	0,69	-0,30	0,19	-0,18	-0,01	0,49	-0,05	-0,12	0,24	-0,09	0,16
Micro porosidade	0,21	0,25	0,32	0,01	0,33	-0,28	0,05	0,38	0,16	0,04	-0,01	-0,19	0,28
CC	-0,02	0,04	0,08	0,23	0,36	-0,40	0,10	0,25	0,23	0,08	-0,11	-0,20	0,28
PDMacro	0,48	0,47	0,42	-0,39	0,19	0,00	-0,15	0,31	0,37	0,33	-0,18	-0,22	0,07
PDMatriz	0,45	0,46	0,60	-0,21	0,15	-0,18	0,03	0,42	-0,15	-0,21	0,29	-0,03	0,15
CAMatriz	0,59	0,51	0,63	-0,58	-0,33	0,33	-0,10	0,17	-0,51	-0,38	0,51	0,23	-0,21
CAt	0,65	0,58	0,67	-0,62	-0,23	0,29	-0,14	0,24	-0,34	-0,24	0,40	0,15	-0,17
CC/Pt	-0,62	-0,55	-0,63	0,61	0,25	-0,30	0,13	-0,20	0,34	0,23	-0,38	-0,16	0,18
CAt/Pt	0,62	0,55	0,63	-0,61	-0,25	0,30	-0,13	0,20	-0,34	-0,23	0,38	0,16	-0,18

*Valores em vermelho foram significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Anexo 1. Matriz de Correlação das variáveis para a camada de 0 a 15 cm

	Ca	Mg	Sb	CTC	S	Cess	RPc	Rpa	Argila	Silte	Areia	(θ_e)	(θ_g)
PRODrn	0,00	0,33	0,08	0,17	0,48	0,05	0,25	0,40	-0,47	0,54	-0,33	0,31	-0,20
PROD. Feijão	0,02	0,35	0,10	0,17	0,42	0,02	0,22	0,36	-0,39	0,47	-0,35	0,21	-0,13
PROD. Milho	0,01	0,29	0,08	0,25	0,53	-0,04	0,19	0,40	-0,60	0,66	-0,26	0,54	-0,05
CEa	0,17	-0,01	0,14	0,02	-0,57	-0,07	-0,19	-0,33	0,79	-0,80	0,06	-0,20	0,35
Elevação	0,49	0,55	0,51	0,27	-0,17	0,15	0,18	0,18	-0,24	0,30	-0,30	-0,34	0,16
Declividade	-0,13	-0,13	-0,14	-0,16	-0,10	0,20	0,37	0,25	-0,25	0,23	0,07	0,25	-0,45
P	-0,25	0,04	-0,18	-0,06	0,54	0,59	-0,14	-0,13	-0,30	0,34	-0,21	0,12	0,01
MO	0,25	0,34	0,31	0,36	0,26	0,28	0,54	0,66	-0,75	0,83	-0,36	0,47	0,09
V%	0,91	0,75	0,90	0,80	-0,63	0,15	0,51	0,42	-0,10	0,09	0,05	-0,23	-0,07
pH	0,68	0,56	0,67	0,28	-0,51	0,18	0,51	0,45	-0,18	0,18	0,02	-0,13	-0,17
H+Al	-0,68	-0,43	-0,64	-0,20	0,70	-0,03	-0,41	-0,31	-0,01	0,04	-0,11	0,31	0,07
Al	-0,61	-0,55	-0,61	-0,37	0,42	-0,10	-0,39	-0,36	0,20	-0,17	-0,15	-0,16	0,03
K	0,56	0,50	0,61	0,60	-0,18	0,28	0,51	0,49	-0,27	0,30	-0,11	0,17	0,10
Ca	1,00	0,80	0,99	0,84	-0,53	0,01	0,46	0,41	-0,14	0,14	0,00	-0,27	-0,04
Mg	0,80	1,00	0,87	0,85	-0,15	0,35	0,47	0,42	-0,24	0,27	-0,12	-0,11	-0,17
Sb	0,99	0,87	1,00	0,88	-0,46	0,11	0,49	0,45	-0,18	0,19	-0,03	-0,22	-0,06
CTC	0,84	0,85	0,88	1,00	-0,16	0,12	0,38	0,38	-0,24	0,26	-0,11	-0,09	-0,03
S	-0,53	-0,15	-0,46	-0,16	1,00	0,10	-0,23	-0,06	-0,29	0,32	-0,11	0,28	-0,09
Cess	0,01	0,35	0,11	0,12	0,10	1,00	0,32	0,16	-0,18	0,20	-0,07	0,25	-0,31
RPc	0,46	0,47	0,49	0,38	-0,23	0,32	1,00	0,93	-0,53	0,51	0,12	0,20	-0,23
Rpa	0,41	0,42	0,45	0,38	-0,06	0,16	0,93	1,00	-0,67	0,66	0,06	0,35	-0,11
Argila	-0,14	-0,24	-0,18	-0,24	-0,29	-0,18	-0,53	-0,67	1,00	-0,98	-0,10	-0,41	0,06
Silte	0,14	0,27	0,19	0,26	0,32	0,20	0,51	0,66	-0,98	1,00	-0,11	0,41	-0,03
Areia	0,00	-0,12	-0,03	-0,11	-0,11	-0,07	0,12	0,06	-0,10	-0,11	1,00	0,01	-0,11
(θ_e)	-0,27	-0,11	-0,22	-0,09	0,28	0,25	0,20	0,35	-0,41	0,41	0,01	1,00	0,13
(θ_g)	-0,04	-0,17	-0,06	-0,03	-0,09	-0,31	-0,23	-0,11	0,06	-0,03	-0,11	0,13	1,00
(θ_v)	-0,08	0,11	-0,03	0,21	0,51	-0,19	0,09	0,32	-0,54	0,57	-0,16	0,47	0,53
Ds	0,08	-0,22	0,01	-0,25	-0,65	0,08	-0,22	-0,41	0,64	-0,67	0,15	-0,44	-0,04
Dr	0,08	-0,22	0,01	-0,25	-0,65	0,08	-0,22	-0,41	0,64	-0,67	0,15	-0,44	-0,04
Macro porosidade	-0,23	0,00	-0,19	0,01	0,59	-0,27	0,05	0,20	-0,19	0,24	-0,22	0,17	-0,47
Pt	0,08	0,28	0,14	0,32	0,37	-0,24	0,17	0,37	-0,49	0,53	-0,19	0,33	0,55
Micro porosidade	0,21	0,27	0,25	0,31	0,02	-0,07	0,13	0,25	-0,37	0,38	-0,06	0,23	0,80
CC	0,27	0,26	0,28	0,29	-0,14	0,00	0,03	0,10	-0,19	0,20	-0,03	0,15	0,86
PDMacro	0,54	0,60	0,55	0,59	0,12	-0,08	0,42	0,54	-0,35	0,37	-0,07	-0,06	-0,44
PDMatriz	-0,05	0,13	0,00	0,18	0,34	-0,22	0,06	0,24	-0,41	0,45	-0,18	0,36	0,68
CAMatriz	-0,44	-0,19	-0,40	-0,19	0,63	-0,27	0,03	0,16	-0,24	0,28	-0,18	0,23	-0,37
CAt	-0,23	0,00	-0,19	0,00	0,59	-0,26	0,15	0,29	-0,31	0,35	-0,18	0,19	-0,45
CC/Pt	0,24	0,02	0,21	0,03	-0,57	0,25	-0,14	-0,27	0,27	-0,31	0,17	-0,15	0,52
CAt/Pt	-0,24	-0,02	-0,21	-0,03	0,57	-0,25	0,14	0,27	-0,27	0,31	-0,17	0,15	-0,52

*Valores em vermelho foram significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Anexo 2. Matriz de Correlação das variáveis para a camada de 0 a 15 cm

	(θ_v)	Ds	Dr	Macro porosidade	Pt	Micro porosidade	CC	PDMacro	PDMatriz	CAMatriz	CAt	CC/Pt	CA/Pt
PRODm	0,59	-0,84	-0,84	0,59	0,56	0,21	-0,02	0,48	0,45	0,59	0,65	-0,62	0,62
PROD. Feijão	0,58	-0,79	-0,79	0,54	0,57	0,25	0,04	0,47	0,46	0,51	0,58	-0,55	0,55
PROD. Milho	0,74	-0,90	-0,90	0,62	0,69	0,32	0,08	0,42	0,60	0,63	0,67	-0,63	0,63
CEa	-0,39	0,67	0,67	-0,53	-0,30	0,01	0,23	-0,39	-0,21	-0,58	-0,62	0,61	-0,61
Elevação	0,01	0,06	0,06	-0,25	0,19	0,33	0,36	0,19	0,15	-0,33	-0,23	0,25	-0,25
Declividade	-0,12	-0,11	-0,11	0,18	-0,18	-0,28	-0,40	0,00	-0,18	0,33	0,29	-0,30	0,30
P	0,12	-0,11	-0,11	-0,11	-0,01	0,05	0,10	-0,15	0,03	-0,10	-0,14	0,13	-0,13
MO	0,55	-0,57	-0,57	0,16	0,49	0,38	0,25	0,31	0,42	0,17	0,24	-0,20	0,20
V%	-0,24	0,25	0,25	-0,36	-0,05	0,16	0,23	0,37	-0,15	-0,51	-0,34	0,34	-0,34
pH	-0,25	0,20	0,20	-0,27	-0,12	0,04	0,08	0,33	-0,21	-0,38	-0,24	0,23	-0,23
H+Al	0,40	-0,43	-0,43	0,42	0,24	-0,01	-0,11	-0,18	0,29	0,51	0,40	-0,38	0,38
Al	0,07	-0,07	-0,07	0,18	-0,09	-0,19	-0,20	-0,22	-0,03	0,23	0,15	-0,16	0,16
K	0,17	-0,11	-0,11	-0,20	0,16	0,28	0,28	0,07	0,15	-0,21	-0,17	0,18	-0,18
Ca	-0,08	0,08	0,08	-0,23	0,08	0,21	0,27	0,54	-0,05	-0,44	-0,23	0,24	-0,24
Mg	0,11	-0,22	-0,22	0,00	0,28	0,27	0,26	0,60	0,13	-0,19	0,00	0,02	-0,02
Sb	-0,03	0,01	0,01	-0,19	0,14	0,25	0,28	0,55	0,00	-0,40	-0,19	0,21	-0,21
CTC	0,21	-0,25	-0,25	0,01	0,32	0,31	0,29	0,59	0,18	-0,19	0,00	0,03	-0,03
S	0,51	-0,65	-0,65	0,59	0,37	0,02	-0,14	0,12	0,34	0,63	0,59	-0,57	0,57
Cess	-0,19	0,08	0,08	-0,27	-0,24	-0,07	0,00	-0,08	-0,22	-0,27	-0,28	0,25	-0,25
RPc	0,09	-0,22	-0,22	0,05	0,17	0,13	0,03	0,42	0,06	0,03	0,15	-0,14	0,14
Rpa	0,32	-0,41	-0,41	0,20	0,37	0,25	0,10	0,54	0,24	0,16	0,29	-0,27	0,27
Argila	-0,54	0,64	0,64	-0,19	-0,49	-0,37	-0,19	-0,35	-0,41	-0,24	-0,31	0,27	-0,27
Silte	0,57	-0,67	-0,67	0,24	0,53	0,38	0,20	0,37	0,45	0,28	0,35	-0,31	0,31
Areia	-0,16	0,15	0,15	-0,22	-0,19	-0,06	-0,03	-0,07	-0,18	-0,18	-0,18	0,17	-0,17
(θ_e)	0,47	-0,44	-0,44	0,17	0,33	0,23	0,15	-0,06	0,36	0,23	0,19	-0,15	0,15
(θ_g)	0,53	-0,04	-0,04	-0,47	0,55	0,80	0,88	-0,44	0,68	-0,37	-0,45	0,52	-0,52
(θ_v)	1,00	-0,86	-0,86	0,27	0,94	0,77	0,58	0,12	0,94	0,35	0,34	-0,26	0,26
Ds	-0,86	1,00	1,00	-0,61	-0,80	-0,43	-0,17	-0,41	-0,71	-0,65	-0,69	0,63	-0,63
Dr	-0,86	1,00	1,00	-0,61	-0,80	-0,43	-0,17	-0,41	-0,71	-0,65	-0,69	0,63	-0,63
Macro porosidade	0,27	-0,61	-0,61	1,00	0,25	-0,33	-0,56	0,57	0,11	0,92	0,98	-0,98	0,98
Pt	0,94	-0,80	-0,80	0,25	1,00	0,83	0,64	0,23	0,97	0,30	0,33	-0,24	0,24
Micro porosidade	0,77	-0,43	-0,43	-0,33	0,83	1,00	0,95	-0,11	0,88	-0,24	-0,24	0,33	-0,33
CC	0,58	-0,17	-0,17	-0,56	0,64	0,95	1,00	-0,22	0,72	-0,51	-0,51	0,59	-0,59
PDMacro	0,12	-0,41	-0,41	0,57	0,23	-0,11	-0,22	1,00	-0,03	0,28	0,53	-0,53	0,53
PDMatriz	0,94	-0,71	-0,71	0,11	0,97	0,88	0,72	-0,03	1,00	0,23	0,20	-0,11	0,11
CAMatriz	0,35	-0,65	-0,65	0,92	0,30	-0,24	-0,51	0,28	0,23	1,00	0,96	-0,96	0,96
CAt	0,34	-0,69	-0,69	0,98	0,33	-0,24	-0,51	0,53	0,20	0,96	1,00	-1,00	1,00
CC/Pt	-0,26	0,63	0,63	-0,98	-0,24	0,33	0,59	-0,53	-0,11	-0,96	-1,00	1,00	-1,00
CAt/Pt	0,26	-0,63	-0,63	0,98	0,24	-0,33	-0,59	0,53	0,11	0,96	1,00	-1,00	1,00

*Valores em vermelho foram significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Anexo 1. Matriz de Correlação das variáveis para a camada de 0 a 15 cm

	PRODm	PROD. Feijão	PROD. Milho	CEa	Elevação	Declividade	P	MO	V%	pH	H+A	Al	K
PRODrn	1,00	0,98	0,87	-0,60	0,13	0,14	0,18	0,67	0,03	0,21	0,22	0,25	0,29
PROD. Feijão	0,98	1,00	0,80	-0,51	0,17	0,02	0,20	0,63	0,11	0,27	0,14	0,22	0,28
PROD. Milho	0,87	0,80	1,00	-0,65	0,08	0,19	0,17	0,71	-0,21	-0,03	0,46	0,36	0,30
CEa	-0,60	-0,51	-0,65	1,00	-0,11	-0,41	-0,31	-0,69	0,23	0,07	-0,43	-0,32	0,11
Elevação	0,13	0,17	0,08	-0,11	1,00	-0,24	0,53	0,50	0,14	0,21	-0,10	-0,04	0,35
Declividade	0,14	0,02	0,19	-0,41	-0,24	1,00	-0,13	0,23	0,16	0,18	-0,06	-0,26	-0,13
P	0,18	0,20	0,17	-0,31	0,53	-0,13	1,00	0,59	-0,27	-0,22	0,36	0,23	0,24
MO	0,67	0,63	0,71	-0,69	0,50	0,23	0,59	1,00	-0,05	0,11	0,28	0,08	0,28
V%	0,03	0,11	-0,21	0,23	0,14	0,16	-0,27	-0,05	1,00	0,94	-0,93	-0,86	0,22
pH	0,21	0,27	-0,03	0,07	0,21	0,18	-0,22	0,11	0,94	1,00	-0,85	-0,79	0,30
H+Al	0,22	0,14	0,46	-0,43	-0,10	-0,06	0,36	0,28	-0,93	-0,85	1,00	0,87	-0,16
Al	0,25	0,22	0,36	-0,32	-0,04	-0,26	0,23	0,08	-0,86	-0,79	0,87	1,00	-0,27
K	0,29	0,28	0,30	0,11	0,35	-0,13	0,24	0,28	0,22	0,30	-0,16	-0,27	1,00
Ca	0,19	0,26	-0,03	0,03	0,24	0,18	-0,17	0,12	0,96	0,95	-0,81	-0,76	0,23
Mg	0,16	0,25	-0,05	0,19	-0,06	0,21	-0,38	-0,04	0,90	0,82	-0,75	-0,69	0,06
Sb	0,20	0,27	-0,02	0,09	0,17	0,19	-0,22	0,09	0,97	0,94	-0,81	-0,77	0,24
CTC	0,68	0,67	0,68	-0,53	0,14	0,22	0,18	0,59	0,15	0,23	0,22	0,09	0,14
S	0,44	0,38	0,52	-0,53	-0,21	-0,10	0,27	0,28	-0,73	-0,59	0,81	0,77	-0,17
Cess	0,09	0,11	0,15	-0,25	0,17	-0,44	0,46	0,25	-0,48	-0,31	0,50	0,41	0,12
RPc	-0,21	-0,21	-0,36	0,08	-0,16	0,30	0,06	-0,15	0,10	0,14	-0,25	-0,26	0,21
Rpa	-0,27	-0,27	-0,39	0,14	-0,18	0,29	0,02	-0,20	0,09	0,11	-0,25	-0,27	0,21
Argila	-0,32	-0,24	-0,51	0,69	-0,23	-0,29	-0,41	-0,73	0,10	-0,10	-0,21	0,02	-0,14
Silte	0,47	0,40	0,61	-0,75	0,31	0,25	0,47	0,85	-0,10	0,09	0,27	0,04	0,20
Areia	-0,55	-0,56	-0,41	0,28	-0,31	0,10	-0,25	-0,53	0,01	0,02	-0,23	-0,21	-0,24
(θe)	0,32	0,24	0,58	-0,41	-0,02	-0,04	0,38	0,52	-0,45	-0,26	0,53	0,29	0,22
(θg)	-0,04	-0,04	0,20	0,00	0,04	-0,36	0,32	0,26	-0,08	-0,04	0,13	-0,13	0,35
(θv)	0,62	0,57	0,77	-0,59	-0,02	0,01	0,32	0,67	-0,18	0,03	0,38	0,18	0,24
Ds	-0,84	-0,79	-0,87	0,75	0,05	-0,21	-0,22	-0,70	0,12	-0,10	-0,37	-0,28	-0,10
Dr	-0,84	-0,79	-0,87	0,75	0,05	-0,21	-0,22	-0,70	0,12	-0,10	-0,37	-0,28	-0,10
Macro porosidade	0,47	0,47	0,32	-0,38	-0,26	0,37	-0,03	0,21	-0,13	-0,08	0,18	0,31	-0,50
Pt	0,51	0,48	0,61	-0,53	-0,08	0,06	0,37	0,56	-0,13	0,06	0,28	0,11	0,09
Micro porosidade	0,22	0,19	0,41	-0,29	0,07	-0,16	0,38	0,43	-0,05	0,11	0,17	-0,08	0,39
CC	0,08	0,06	0,30	-0,16	0,11	-0,28	0,44	0,33	-0,12	-0,01	0,20	-0,04	0,41
PDMacro	-0,19	-0,14	-0,39	0,20	-0,24	-0,05	0,15	-0,25	-0,24	-0,32	0,12	0,20	-0,38
PDMatriz	0,53	0,48	0,67	-0,55	-0,02	0,07	0,31	0,59	-0,06	0,14	0,23	0,05	0,18
CAMatriz	0,71	0,67	0,63	-0,62	-0,18	0,51	-0,13	0,45	0,08	0,23	0,08	0,13	-0,29
CAt	0,60	0,58	0,44	-0,51	-0,26	0,46	-0,07	0,33	-0,02	0,09	0,12	0,20	-0,41
CC/Pt	-0,56	-0,55	-0,38	0,47	0,24	-0,46	0,11	-0,29	0,00	-0,10	-0,09	-0,19	0,44
CAt/Pt	0,56	0,55	0,38	-0,47	-0,24	0,46	-0,11	0,29	0,00	0,10	0,09	0,19	-0,44

*Valores em vermelho foram significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Anexo 2. Matriz de Correlação das variáveis para a camada de 15 a 25 cm

	Ca	Mg	Sb	CTC	S	Cess	RPc	Rpa	Argila	Silte	Areia	(θe)	(θg)
PRODrn	0,19	0,16	0,20	0,88	0,44	0,09	-0,21	-0,27	-0,32	0,47	-0,55	0,32	-0,04
PROD. Feijão	0,26	0,25	0,27	0,87	0,38	0,11	-0,21	-0,27	-0,24	0,40	-0,58	0,24	-0,04
PROD. Milho	-0,03	-0,05	-0,02	0,88	0,52	0,15	-0,38	-0,39	-0,51	0,61	-0,41	0,58	0,20
CEa	0,03	0,19	0,09	-0,53	-0,53	-0,25	0,08	0,14	0,69	-0,75	0,28	-0,41	0,00
Elevação	0,24	-0,06	0,17	0,14	-0,21	0,17	-0,18	-0,18	-0,23	0,31	-0,31	-0,02	0,04
Declividade	0,18	0,21	0,19	0,22	-0,10	-0,44	0,30	0,29	-0,29	0,25	0,10	-0,04	-0,38
P	-0,17	-0,38	-0,22	0,18	0,27	0,46	0,06	0,02	-0,41	0,47	-0,25	0,38	0,32
MO	0,12	-0,04	0,09	0,59	0,28	0,25	-0,15	-0,20	-0,73	0,85	-0,53	0,52	0,26
V%	0,96	0,90	0,97	0,15	-0,73	-0,48	0,10	0,09	0,10	-0,10	0,01	-0,45	-0,08
pH	0,95	0,82	0,94	0,23	-0,59	-0,31	0,14	0,11	-0,10	0,09	0,02	-0,26	-0,04
H+Al	-0,81	-0,75	-0,81	0,22	0,81	0,50	-0,25	-0,25	-0,21	0,27	-0,23	0,53	0,13
Al	-0,76	-0,69	-0,77	0,09	0,77	0,41	-0,26	-0,27	0,02	0,04	-0,21	0,29	-0,13
K	0,23	0,06	0,24	0,14	-0,17	0,12	0,21	0,21	-0,14	0,20	-0,24	0,22	0,35
Ca	1,00	0,88	0,99	0,39	-0,61	-0,35	-0,03	-0,06	-0,04	0,06	-0,10	-0,34	-0,03
Mg	0,88	1,00	0,93	0,38	-0,56	-0,48	-0,02	-0,03	0,20	-0,15	-0,12	-0,43	-0,15
Sb	0,99	0,93	1,00	0,40	-0,61	-0,39	-0,02	-0,04	0,03	0,01	-0,12	-0,36	-0,05
CTC	0,39	0,38	0,40	1,00	0,25	0,14	-0,42	-0,47	-0,28	0,43	-0,58	0,23	0,12
S	-0,61	-0,56	-0,61	0,25	1,00	0,57	-0,20	-0,24	-0,31	0,35	-0,20	0,63	0,20
Cess	-0,35	-0,48	-0,39	0,14	0,57	1,00	0,03	0,00	-0,35	0,32	0,04	0,52	0,47
RPc	-0,03	-0,02	-0,02	-0,42	-0,20	0,03	1,00	0,99	-0,02	-0,08	0,31	-0,18	-0,29
Rpa	-0,06	-0,03	-0,04	-0,47	-0,24	0,00	0,99	1,00	0,03	-0,14	0,36	-0,20	-0,29
Argila	-0,04	0,20	0,03	-0,28	-0,31	-0,35	-0,02	0,03	1,00	-0,95	0,00	-0,73	-0,50
Silte	0,06	-0,15	0,01	0,43	0,35	0,32	-0,08	-0,14	-0,95	1,00	-0,30	0,71	0,47
Areia	-0,10	-0,12	-0,12	-0,58	-0,20	0,04	0,31	0,36	0,00	-0,30	1,00	-0,03	0,04
(θe)	-0,34	-0,43	-0,36	0,23	0,63	0,52	-0,18	-0,20	-0,73	0,71	-0,03	1,00	0,71
(θg)	-0,03	-0,15	-0,05	0,12	0,20	0,47	-0,29	-0,29	-0,50	0,47	0,04	0,71	1,00
(θv)	0,00	-0,09	-0,02	0,58	0,57	0,48	-0,27	-0,31	-0,75	0,78	-0,21	0,87	0,64
Ds	-0,07	-0,04	-0,07	-0,70	-0,59	-0,32	0,20	0,25	0,63	-0,70	0,32	-0,65	-0,22
Dr	-0,07	-0,04	-0,07	-0,70	-0,59	-0,32	0,20	0,25	0,63	-0,70	0,32	-0,65	-0,22
Macro porosidade	-0,13	0,08	-0,09	0,13	0,35	-0,16	0,07	0,06	-0,01	0,01	-0,01	-0,05	-0,53
Pt	0,01	-0,04	0,00	0,44	0,54	0,49	-0,13	-0,15	-0,68	0,63	0,08	0,80	0,54
Micro porosidade	0,08	-0,09	0,05	0,35	0,33	0,58	-0,17	-0,18	-0,66	0,61	0,08	0,82	0,85
CC	-0,02	-0,20	-0,05	0,23	0,30	0,59	-0,19	-0,19	-0,57	0,52	0,10	0,79	0,90
PDMacro	-0,36	-0,17	-0,33	-0,36	0,06	0,03	0,39	0,42	0,47	-0,49	0,15	-0,31	-0,47
PDMatriz	0,10	0,00	0,08	0,50	0,49	0,45	-0,22	-0,24	-0,76	0,72	0,02	0,83	0,63
CAMatriz	0,18	0,27	0,20	0,45	0,35	-0,13	-0,07	-0,12	-0,38	0,39	-0,10	0,19	-0,28
CAt	0,04	0,20	0,06	0,29	0,35	-0,11	0,08	0,05	-0,18	0,19	-0,04	0,06	-0,44
CC/Pt	-0,04	-0,21	-0,07	-0,24	-0,29	0,17	-0,10	-0,07	0,10	-0,12	0,06	0,05	0,53
CAt/Pt	0,04	0,21	0,07	0,24	0,29	-0,17	0,10	0,07	-0,10	0,12	-0,06	-0,05	-0,53

*Valores em vermelho foram significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Anexo 2. Matriz de Correlação das variáveis para a camada de 15 a 25 cm

	(θ_v)	Ds	Dr	Macro porosidade	Pt	Micro porosidade	CC	PDMacro	PDMatriz	CAMatriz	CAt	CC/Pt	CA/Pt
PROD _m	0,62	-0,84	-0,84	0,47	0,51	0,22	0,08	-0,19	0,53	0,71	0,60	-0,56	0,56
PROD. Feijão	0,57	-0,79	-0,79	0,47	0,48	0,19	0,06	-0,14	0,48	0,67	0,58	-0,55	0,55
PROD. Milho	0,77	-0,87	-0,87	0,32	0,61	0,41	0,30	-0,39	0,67	0,63	0,44	-0,38	0,38
CEa	-0,59	0,75	0,75	-0,38	-0,53	-0,29	-0,16	0,20	-0,55	-0,62	-0,51	0,47	-0,47
Elevação	-0,02	0,05	0,05	-0,26	-0,08	0,07	0,11	-0,24	-0,02	-0,18	-0,26	0,24	-0,24
Declividade	0,01	-0,21	-0,21	0,37	0,06	-0,16	-0,28	-0,05	0,07	0,51	0,46	-0,46	0,46
P	0,32	-0,22	-0,22	-0,03	0,37	0,38	0,44	0,15	0,31	-0,13	-0,07	0,11	-0,11
MO	0,67	-0,70	-0,70	0,21	0,56	0,43	0,33	-0,25	0,59	0,45	0,33	-0,29	0,29
V%	-0,18	0,12	0,12	-0,13	-0,13	-0,05	-0,12	-0,24	-0,06	0,08	-0,02	0,00	0,00
pH	0,03	-0,10	-0,10	-0,08	0,06	0,11	-0,01	-0,32	0,14	0,23	0,09	-0,10	0,10
H+Al	0,38	-0,37	-0,37	0,18	0,28	0,17	0,20	0,12	0,23	0,08	0,12	-0,09	0,09
Al	0,18	-0,28	-0,28	0,31	0,11	-0,08	-0,04	0,20	0,05	0,13	0,20	-0,19	0,19
K	0,24	-0,10	-0,10	-0,50	0,09	0,39	0,41	-0,38	0,18	-0,29	-0,41	0,44	-0,44
Ca	0,00	-0,07	-0,07	-0,13	0,01	0,08	-0,02	-0,36	0,10	0,18	0,04	-0,04	0,04
Mg	-0,09	-0,04	-0,04	0,08	-0,04	-0,09	-0,20	-0,17	0,00	0,27	0,20	-0,21	0,21
Sb	-0,02	-0,07	-0,07	-0,09	0,00	0,05	-0,05	-0,33	0,08	0,20	0,06	-0,07	0,07
CTC	0,56	-0,70	-0,70	0,13	0,44	0,35	0,23	-0,36	0,50	0,45	0,29	-0,24	0,24
S	0,57	-0,59	-0,59	0,35	0,54	0,33	0,30	0,06	0,49	0,35	0,35	-0,29	0,29
Cess	0,48	-0,32	-0,32	-0,16	0,49	0,58	0,59	0,03	0,45	-0,13	-0,11	0,17	-0,17
RPc	-0,27	0,20	0,20	0,07	-0,13	-0,17	-0,19	0,39	-0,22	-0,07	0,08	-0,10	0,10
Rpa	-0,31	0,25	0,25	0,06	-0,15	-0,18	-0,19	0,42	-0,24	-0,12	0,05	-0,07	0,07
Argila	-0,75	0,63	0,63	-0,01	-0,68	-0,66	-0,57	0,47	-0,76	-0,38	-0,18	0,10	-0,10
Silte	0,78	-0,70	-0,70	0,01	0,63	0,61	0,52	-0,49	0,72	0,39	0,19	-0,12	0,12
Areia	-0,21	0,32	0,32	-0,01	0,06	0,06	0,10	0,15	0,02	-0,10	-0,04	0,06	-0,06
(θ_e)	0,87	-0,65	-0,65	-0,05	0,80	0,82	0,79	-0,31	0,83	0,19	0,06	0,05	-0,05
(θ_g)	0,64	-0,22	-0,22	-0,53	0,54	0,85	0,90	-0,47	0,63	-0,28	-0,44	0,53	-0,53
(θ_v)	1,00	-0,89	-0,89	0,09	0,90	0,84	0,74	-0,39	0,95	0,44	0,27	-0,16	0,16
Ds	-0,89	1,00	1,00	-0,44	-0,82	-0,55	-0,39	0,23	-0,83	-0,75	-0,61	0,53	-0,53
Dr	-0,89	1,00	1,00	-0,44	-0,82	-0,55	-0,39	0,23	-0,83	-0,75	-0,61	0,53	-0,53
Macro porosidade	0,09	-0,44	-0,44	1,00	0,29	-0,32	-0,43	0,52	0,14	0,81	0,96	-0,97	0,97
Pt	0,90	-0,82	-0,82	0,29	1,00	0,82	0,72	-0,10	0,97	0,49	0,42	-0,31	0,31
Micro porosidade	0,84	-0,55	-0,55	-0,32	0,82	1,00	0,98	-0,41	0,87	0,00	-0,16	0,28	-0,28
CC	0,74	-0,39	-0,39	-0,43	0,72	0,98	1,00	-0,37	0,78	-0,19	-0,32	0,43	-0,43
PDMacro	-0,39	0,23	0,23	0,52	-0,10	-0,41	-0,37	1,00	-0,35	-0,03	0,34	-0,38	0,38
PDMatriz	0,95	-0,83	-0,83	0,14	0,97	0,87	0,78	-0,35	1,00	0,47	0,31	-0,19	0,19
CAMatriz	0,44	-0,75	-0,75	0,81	0,49	0,00	-0,19	-0,03	0,47	1,00	0,93	-0,90	0,90
CAt	0,27	-0,61	-0,61	0,96	0,42	-0,16	-0,32	0,34	0,31	0,93	1,00	-0,99	0,99
CC/Pt	-0,16	0,53	0,53	-0,97	-0,31	0,28	0,43	-0,38	-0,19	-0,90	-0,99	1,00	-1,00
CAt/Pt	0,16	-0,53	-0,53	0,97	0,31	-0,28	-0,43	0,38	0,19	0,90	0,99	-1,00	1,00

*Valores em vermelho foram significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Anexo 2. Matriz de Correlação das variáveis para a camada de 15 a 25 cm

	PRODm	PROD. Feijão	PROD. Milho	CEa	Elevação	Declividade	P	MO	V%	pH	H+A	Al	K
PRODm	1,00	0,98	0,87	-0,60	0,13	0,14	0,42	0,63	0,25	0,19	0,36	0,12	0,31
PROD. Feijão	0,98	1,00	0,80	-0,51	0,17	0,02	0,37	0,57	0,32	0,25	0,28	0,08	0,32
PROD. Milho	0,87	0,80	1,00	-0,65	0,08	0,19	0,39	0,68	-0,02	-0,07	0,53	0,28	0,21
CEa	-0,60	-0,51	-0,65	1,00	-0,11	-0,41	-0,64	-0,66	0,13	0,06	-0,50	-0,21	0,20
Elevação	0,13	0,17	0,08	-0,11	1,00	-0,24	0,00	0,30	0,11	0,21	-0,19	-0,19	0,20
Declividade	0,14	0,02	0,19	-0,41	-0,24	1,00	-0,08	0,21	0,02	0,02	0,20	-0,09	-0,14
P	0,42	0,37	0,39	-0,64	0,00	-0,08	1,00	0,31	-0,48	-0,38	0,63	0,57	-0,19
MO	0,63	0,57	0,68	-0,66	0,30	0,21	0,31	1,00	-0,06	-0,02	0,43	0,05	0,14
V%	0,25	0,32	-0,02	0,13	0,11	0,02	-0,48	-0,06	1,00	0,92	-0,71	-0,75	0,41
pH	0,19	0,25	-0,07	0,06	0,21	0,02	-0,38	-0,02	0,92	1,00	-0,80	-0,85	0,44
H+A	0,36	0,28	0,53	-0,50	-0,19	0,20	0,63	0,43	-0,71	-0,80	1,00	0,85	-0,33
Al	0,12	0,08	0,28	-0,21	-0,19	-0,09	0,57	0,05	-0,75	-0,85	0,85	1,00	-0,44
K	0,31	0,32	0,21	0,20	0,20	-0,14	-0,19	0,14	0,41	0,44	-0,33	-0,44	1,00
Ca	0,46	0,50	0,21	-0,18	0,16	0,17	-0,26	0,18	0,91	0,79	-0,40	-0,53	0,34
Mg	0,53	0,57	0,34	-0,07	-0,14	0,20	-0,29	0,10	0,84	0,66	-0,27	-0,40	0,20
Sb	0,51	0,54	0,27	-0,13	0,08	0,17	-0,29	0,16	0,91	0,78	-0,38	-0,52	0,36
CTC	0,77	0,72	0,73	-0,58	-0,11	0,33	0,35	0,54	0,11	-0,10	0,62	0,37	-0,01
S	0,04	-0,01	0,13	-0,08	0,12	-0,17	0,49	0,26	-0,56	-0,39	0,33	0,27	-0,06
Cess	0,27	0,30	0,22	-0,06	0,30	-0,42	0,21	0,40	0,15	0,10	0,03	-0,10	0,03
RPc	-0,77	-0,71	-0,74	0,56	-0,18	-0,21	-0,34	-0,76	-0,26	-0,27	-0,24	0,04	-0,13
Rpa	-0,81	-0,76	-0,78	0,69	-0,20	-0,26	-0,43	-0,75	-0,23	-0,25	-0,30	-0,04	-0,04
Argila	-0,24	-0,20	-0,29	0,63	0,01	-0,47	-0,14	-0,13	-0,27	-0,33	0,11	0,14	0,20
Silte	0,53	0,50	0,51	-0,77	0,23	0,42	0,36	0,35	0,28	0,34	0,03	-0,09	-0,12
Areia	-0,44	-0,48	-0,30	0,08	-0,42	0,21	-0,36	-0,36	0,06	0,07	-0,27	-0,12	-0,18
(θ_e)	0,04	0,03	0,03	-0,34	0,54	0,26	0,13	0,37	-0,09	0,16	-0,14	-0,28	-0,01
(θ_g)	-0,20	-0,16	-0,06	0,43	-0,13	-0,33	0,00	-0,28	-0,22	-0,23	0,02	0,12	-0,08
(θ_v)	0,83	0,80	0,84	-0,48	-0,02	0,22	0,33	0,55	0,21	0,18	0,27	0,04	0,22
Ds	-0,92	-0,88	-0,88	0,66	-0,06	-0,34	-0,34	-0,71	-0,30	-0,27	-0,27	0,03	-0,28
Dr	-0,92	-0,88	-0,88	0,66	-0,06	-0,34	-0,34	-0,71	-0,30	-0,27	-0,27	0,03	-0,28
Macro porosidade	0,45	0,40	0,32	-0,67	0,24	0,48	0,05	0,52	0,43	0,39	-0,02	-0,25	0,09
Pt	0,74	0,71	0,67	-0,57	0,02	0,39	0,24	0,50	0,33	0,28	0,17	-0,03	0,12
Micro porosidade	0,43	0,44	0,47	-0,05	-0,18	0,01	0,22	0,10	-0,01	-0,03	0,20	0,18	0,05
CC	0,16	0,18	0,23	0,21	-0,21	-0,17	0,18	-0,13	-0,22	-0,25	0,23	0,32	-0,07
PDMacro	-0,03	-0,03	-0,25	-0,19	0,13	0,09	0,29	-0,10	-0,14	-0,18	0,18	0,29	-0,27
PDMatriz	0,73	0,70	0,74	-0,49	-0,02	0,35	0,13	0,52	0,36	0,33	0,11	-0,13	0,20
CAMatriz	0,56	0,51	0,50	-0,65	0,17	0,48	-0,03	0,61	0,54	0,53	-0,10	-0,40	0,25
CAt	0,54	0,49	0,41	-0,70	0,21	0,50	0,06	0,57	0,49	0,47	-0,05	-0,31	0,16
CC/Pt	-0,49	-0,44	-0,37	0,69	-0,21	-0,50	-0,05	-0,55	-0,47	-0,46	0,05	0,32	-0,15
CAt/Pt	0,49	0,44	0,37	-0,69	0,21	0,50	0,05	0,55	0,47	0,46	-0,05	-0,32	0,15

*Valores em vermelho foram significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Anexo 3. Matriz de Correlação das variáveis para a camada de 25 a 40 cm

	Ca	Mg	Sb	CTC	S	Cess	RPC	Rpa	Argila	Silte	Areia	(θe)	(θg)
PRODrn	0,46	0,53	0,51	0,77	0,04	0,27	-0,77	-0,81	-0,24	0,53	-0,44	0,04	-0,20
PROD. Feijão	0,50	0,57	0,54	0,72	-0,01	0,30	-0,71	-0,76	-0,20	0,50	-0,48	0,03	-0,16
PROD. Milho	0,21	0,34	0,27	0,73	0,13	0,22	-0,74	-0,78	-0,29	0,51	-0,30	0,03	-0,06
CEa	-0,18	-0,07	-0,13	-0,58	-0,08	-0,06	0,56	0,69	0,63	-0,77	0,08	-0,34	0,43
Elevação	0,16	-0,14	0,08	-0,11	0,12	0,30	-0,18	-0,20	0,01	0,23	-0,42	0,54	-0,13
Declividade	0,17	0,20	0,17	0,33	-0,17	-0,42	-0,21	-0,26	-0,47	0,42	0,21	0,26	-0,33
P	-0,26	-0,29	-0,29	0,35	0,49	0,21	-0,34	-0,43	-0,14	0,36	-0,36	0,13	0,00
MO	0,18	0,10	0,16	0,54	0,26	0,40	-0,76	-0,75	-0,13	0,35	-0,36	0,37	-0,28
V%	0,91	0,84	0,91	0,11	-0,56	0,15	-0,26	-0,23	-0,27	0,28	0,06	-0,09	-0,22
pH	0,79	0,66	0,78	-0,10	-0,39	0,10	-0,27	-0,25	-0,33	0,34	0,07	0,16	-0,23
H+Al	-0,40	-0,27	-0,38	0,62	0,33	0,03	-0,24	-0,30	0,11	0,03	-0,27	-0,14	0,02
Al	-0,53	-0,40	-0,52	0,37	0,27	-0,10	0,04	-0,04	0,14	-0,09	-0,12	-0,28	0,12
K	0,34	0,20	0,36	-0,01	-0,06	0,03	-0,13	-0,04	0,20	-0,12	-0,18	-0,01	-0,08
Ca	1,00	0,89	0,99	0,46	-0,59	0,19	-0,46	-0,49	-0,38	0,47	-0,07	-0,10	-0,33
Mg	0,89	1,00	0,94	0,54	-0,56	0,17	-0,46	-0,47	-0,29	0,37	-0,05	-0,28	-0,12
Sb	0,99	0,94	1,00	0,49	-0,59	0,18	-0,47	-0,49	-0,34	0,43	-0,08	-0,16	-0,27
CTC	0,46	0,54	0,49	1,00	-0,18	0,19	-0,63	-0,70	-0,18	0,40	-0,32	-0,26	-0,21
S	-0,59	-0,56	-0,59	-0,18	1,00	0,45	-0,27	-0,14	0,25	-0,15	-0,23	0,43	0,48
Cess	0,19	0,17	0,18	0,19	0,45	1,00	-0,60	-0,48	0,13	0,10	-0,43	0,11	0,41
RPC	-0,46	-0,46	-0,47	-0,63	-0,27	-0,60	1,00	0,96	0,33	-0,55	0,31	-0,23	0,05
Rpa	-0,49	-0,47	-0,49	-0,70	-0,14	-0,48	0,96	1,00	0,45	-0,71	0,33	-0,25	0,16
Argila	-0,38	-0,29	-0,34	-0,18	0,25	0,13	0,33	0,45	1,00	-0,87	-0,49	-0,22	0,32
Silte	0,47	0,37	0,43	0,40	-0,15	0,10	-0,55	-0,71	-0,87	1,00	-0,01	0,39	-0,31
Areia	-0,07	-0,05	-0,08	-0,32	-0,23	-0,43	0,31	0,33	-0,49	-0,01	1,00	-0,24	-0,11
(θe)	-0,10	-0,28	-0,16	-0,26	0,43	0,11	-0,23	-0,25	-0,22	0,39	-0,24	1,00	-0,02
(θg)	-0,33	-0,12	-0,27	-0,21	0,48	0,41	0,05	0,16	0,32	-0,31	-0,11	-0,02	1,00
(θv)	0,37	0,49	0,42	0,61	0,25	0,45	-0,82	-0,81	-0,36	0,57	-0,26	0,19	0,23
Ds	-0,51	-0,54	-0,54	-0,71	-0,08	-0,33	0,86	0,89	0,46	-0,68	0,26	-0,21	0,15
Dr	-0,51	-0,54	-0,54	-0,71	-0,08	-0,33	0,86	0,89	0,46	-0,68	0,26	-0,21	0,15
Macro porosidade	0,61	0,38	0,55	0,44	-0,33	-0,01	-0,47	-0,55	-0,62	0,65	0,09	0,22	-0,79
Pt	0,50	0,53	0,52	0,60	0,15	0,31	-0,77	-0,78	-0,56	0,66	-0,03	0,27	0,01
Micro porosidade	0,02	0,25	0,10	0,27	0,45	0,36	-0,45	-0,38	-0,09	0,17	-0,11	0,11	0,70
CC	-0,26	0,00	-0,18	0,06	0,54	0,29	-0,16	-0,07	0,16	-0,13	-0,08	0,00	0,85
PDMacro	-0,08	-0,24	-0,15	0,05	0,19	-0,11	0,09	0,05	-0,03	0,05	-0,02	0,15	-0,38
PDMatriz	0,51	0,59	0,55	0,57	0,08	0,34	-0,78	-0,78	-0,54	0,63	-0,02	0,21	0,14
CAMatriz	0,72	0,56	0,69	0,48	-0,40	0,07	-0,60	-0,67	-0,65	0,72	0,05	0,20	-0,62
CAt	0,68	0,48	0,63	0,49	-0,33	0,04	-0,56	-0,64	-0,65	0,72	0,05	0,25	-0,73
CC/Pt	-0,66	-0,44	-0,60	-0,46	0,35	-0,01	0,52	0,60	0,63	-0,70	-0,05	-0,24	0,77
CAt/Pt	0,66	0,44	0,60	0,46	-0,35	0,01	-0,52	-0,60	-0,63	0,70	0,05	0,24	-0,77

*Valores em vermelho foram significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Anexo 3. Matriz de Correlação das variáveis para a camada de 25 a 40 cm

	(θv)	Ds	Dr	Macro porosidade	Pt	Micro porosidade	CC	PDMacro	PDMatriz	CAMatriz	CAt	CC/Pt	CA/Pt
PRODrn	0,83	-0,92	-0,92	0,45	0,74	0,43	0,16	-0,03	0,73	0,56	0,54	-0,49	0,49
PROD. Feijão	0,80	-0,88	-0,88	0,40	0,71	0,44	0,18	-0,03	0,70	0,51	0,49	-0,44	0,44
PROD. Milho	0,84	-0,88	-0,88	0,32	0,67	0,47	0,23	-0,25	0,74	0,50	0,41	-0,37	0,37
CEa	-0,48	0,66	0,66	-0,67	-0,57	-0,05	0,21	-0,19	-0,49	-0,65	-0,70	0,69	-0,69
Elevação	-0,02	-0,06	-0,06	0,24	0,02	-0,18	-0,21	0,13	-0,02	0,17	0,21	-0,21	0,21
Declividade	0,22	-0,34	-0,34	0,48	0,39	0,01	-0,17	0,09	0,35	0,48	0,50	-0,50	0,50
P	0,33	-0,34	-0,34	0,05	0,24	0,22	0,18	0,29	0,13	-0,03	0,06	-0,05	0,05
MO	0,55	-0,71	-0,71	0,52	0,50	0,10	-0,13	-0,10	0,52	0,61	0,57	-0,55	0,55
V%	0,21	-0,30	-0,30	0,43	0,33	-0,01	-0,22	-0,14	0,36	0,54	0,49	-0,47	0,47
pH	0,18	-0,27	-0,27	0,39	0,28	-0,03	-0,25	-0,18	0,33	0,53	0,47	-0,46	0,46
H+Al	0,27	-0,27	-0,27	-0,02	0,17	0,20	0,23	0,18	0,11	-0,10	-0,05	0,05	-0,05
Al	0,04	0,03	0,03	-0,25	-0,03	0,18	0,32	0,29	-0,13	-0,40	-0,31	0,32	-0,32
K	0,22	-0,28	-0,28	0,09	0,12	0,05	-0,07	-0,27	0,20	0,25	0,16	-0,15	0,15
Ca	0,37	-0,51	-0,51	0,61	0,50	0,02	-0,26	-0,08	0,51	0,72	0,68	-0,66	0,66
Mg	0,49	-0,54	-0,54	0,38	0,53	0,25	0,00	-0,24	0,59	0,56	0,48	-0,44	0,44
Sb	0,42	-0,54	-0,54	0,55	0,52	0,10	-0,18	-0,15	0,55	0,69	0,63	-0,60	0,60
CTC	0,61	-0,71	-0,71	0,44	0,60	0,27	0,06	0,05	0,57	0,48	0,49	-0,46	0,46
S	0,25	-0,08	-0,08	-0,33	0,15	0,45	0,54	0,19	0,08	-0,40	-0,33	0,35	-0,35
Cess	0,45	-0,33	-0,33	-0,01	0,31	0,36	0,29	-0,11	0,34	0,07	0,04	-0,01	0,01
RPc	-0,82	0,86	0,86	-0,47	-0,77	-0,45	-0,16	0,09	-0,78	-0,60	-0,56	0,52	-0,52
Rpa	-0,81	0,89	0,89	-0,55	-0,78	-0,38	-0,07	0,05	-0,78	-0,67	-0,64	0,60	-0,60
Argila	-0,36	0,46	0,46	-0,62	-0,56	-0,09	0,16	-0,03	-0,54	-0,65	-0,65	0,63	-0,63
Silte	0,57	-0,68	-0,68	0,65	0,66	0,17	-0,13	0,05	0,63	0,72	0,72	-0,70	0,70
Areia	-0,26	0,26	0,26	0,09	-0,03	-0,11	-0,08	-0,02	-0,02	0,05	0,05	-0,05	0,05
(θe)	0,19	-0,21	-0,21	0,22	0,27	0,11	0,00	0,15	0,21	0,20	0,25	-0,24	0,24
(θg)	0,23	0,15	0,15	-0,79	0,01	0,70	0,85	-0,38	0,14	-0,62	-0,73	0,77	-0,77
(θv)	1,00	-0,92	-0,92	0,24	0,89	0,77	0,50	-0,24	0,94	0,45	0,37	-0,30	0,30
Ds	-0,92	1,00	1,00	-0,55	-0,89	-0,50	-0,16	0,11	-0,90	-0,71	-0,67	0,61	-0,61
Dr	-0,92	1,00	1,00	-0,55	-0,89	-0,50	-0,16	0,11	-0,90	-0,71	-0,67	0,61	-0,61
Macro porosidade	0,24	-0,55	-0,55	1,00	0,51	-0,31	-0,60	0,34	0,38	0,89	0,98	-0,99	0,99
Pt	0,89	-0,89	-0,89	0,51	1,00	0,67	0,37	0,09	0,95	0,57	0,59	-0,52	0,52
Micro porosidade	0,77	-0,50	-0,50	-0,31	0,67	1,00	0,93	-0,19	0,71	-0,14	-0,20	0,28	-0,28
CC	0,50	-0,16	-0,16	-0,60	0,37	0,93	1,00	-0,14	0,41	-0,50	-0,53	0,60	-0,60
PDMacro	-0,24	0,11	0,11	0,34	0,09	-0,19	-0,14	1,00	-0,24	-0,11	0,20	-0,21	0,21
PDMatriz	0,94	-0,90	-0,90	0,38	0,95	0,71	0,41	-0,24	1,00	0,59	0,51	-0,44	0,44
CAMatriz	0,45	-0,71	-0,71	0,89	0,57	-0,14	-0,50	-0,11	0,59	1,00	0,95	-0,95	0,95
CAt	0,37	-0,67	-0,67	0,98	0,59	-0,20	-0,53	0,20	0,51	0,95	1,00	-1,00	1,00
CC/Pt	-0,30	0,61	0,61	-0,99	-0,52	0,28	0,60	-0,21	-0,44	-0,95	-1,00	1,00	-1,00
CA/Pt	0,30	-0,61	-0,61	0,99	0,52	-0,28	-0,60	0,21	0,44	0,95	1,00	-1,00	1,00

*Valores em vermelho foram significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Anexo 3. Matriz de Correlação das variáveis para a camada de 25 a 40 cm