

**MARCELO MARQUES COSTA**

**CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO COMO  
FERRAMENTA PARA AGRICULTURA DE PRECISÃO EM UMA  
ÁREA SOB CERRADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BR  
2011**

MARCELO MARQUES COSTA

**CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO COMO  
FERRAMENTA PARA AGRICULTURA DE PRECISÃO EM UMA  
ÁREA SOB CERRADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 20 de julho de 2011.

---

Prof. Francisco de Assis de Carvalho Pinto  
(Coorientador)

---

Prof. Domingos Sárvio Magalhães Valente

---

Pesq. Paulo César de Lima

---

Prof. Daniel Marçal de Queiroz  
(Orientador)

Esse trabalho e todas as minhas obras, dedico a Deus.

Aos meus pais, Francisco e Almerinda.

À minha esposa Érica, com carinho.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio concedido ao Programa PROCAD UFV-UEG que possibilitou a realização desse trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro à realização da pesquisa.

Ao Professor Daniel Marçal de Queiroz, pela orientação e confiança.

Aos Professores Elton Fialho Reis, Francisco de Assis de Carvalho Pinto e Nerilson Terra Santos pelo auxílio e valiosas sugestões no decorrer do trabalho.

A todos os professores, funcionários e amigos da Universidade Estadual de Goiás - UEG pela colaboração, bom convívio e amizade.

Ao amigo Vandoir Holtz, cuja ajuda foi de grande importância para a realização desse trabalho.

Ao amigo Elson, que muitas vezes me ajudou com boa vontade.

Aos proprietários da Fazenda “Andrea ou Sozinha”, por terem permitido e apoiado à realização desta pesquisa.

Aos professores e colegas do Laboratório de Mecanização Agrícola e do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV pelo auxílio, amizade e bom convívio.

À minha família pelo apoio constante.

À minha esposa Érica pelo carinho, estímulo e compreensão.

Sinceros agradecimentos a todos que colaboraram para que este trabalho fosse realizado.

## BIOGRAFIA

MARCELO MARQUES COSTA, filho de Almerinda Marques Costa e Francisco Marques Costa, nasceu em Registro, BA, no dia 23 de outubro de 1985.

Em julho de 2009 concluiu o curso de Agronomia na Universidade Federal de Goiás

Em agosto de 2009 iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, Área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa.

Em julho de 2011, submeteu-se à defesa de tese.

## ÍNDICE

|   |     |
|---|-----|
| RESUMO .....  | VII |
| ABSTRACT .....  | IX  |
| INTRODUÇÃO GERAL .....  | 1   |
| LITERATURA CITADA .....   | 8   |
| CAPÍTULO 1 .....  | 11  |
| EFEITO DO TEOR DE ÁGUA NA RELAÇÃO ENTRE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA<br>APARENTE E ATRIBUTOS DO SOLO .....                  | 11  |
| RESUMO .....  | 11  |
| ABSTRACT .....  | 11  |
| INTRODUÇÃO .....  | 12  |
| MATERIAL E MÉTODOS .....  | 14  |
| RESULTADOS .....  | 17  |
| DISCUSSÃO .....   | 21  |
| CONCLUSÕES .....  | 22  |
| AGRADECIMENTOS .....  | 23  |
| LITERATURA CITADA .....   | 24  |
| CAPÍTULO 2 .....  | 26  |
| DELIMITAÇÃO DE CLASSES DE MANEJO A PARTIR DA CONDUTIVIDADE<br>ELÉTRICA APARENTE DO SOLO .....                         | 26  |
| RESUMO .....  | 26  |
| ABSTRACT .....  | 26  |
| INTRODUÇÃO .....  | 27  |
| MATERIAL E MÉTODOS .....  | 29  |
| RESULTADOS .....  | 34  |
| DISCUSSÃO .....   | 41  |
| CONCLUSÕES .....  | 44  |
| AGRADECIMENTOS .....  | 44  |
| LITERATURA CITADA .....   | 45  |
| CAPÍTULO 3 .....  | 48  |
| IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES DETERMINANTES DA VARIABILIDADE<br>TEMPORAL DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO ..... | 48  |
| RESUMO .....  | 48  |
| ABSTRACT .....  | 48  |

|  |    |
|--|----|
| INTRODUÇÃO.....  | 49 |
| MATERIAL E MÉTODOS.....  | 51 |
| RESULTADOS .....   | 55 |
| DISCUSSÃO.....   | 62 |
| CONCLUSÕES.....  | 64 |
| AGRADECIMENTOS .....   | 64 |
| LITERATURA CITADA.....   | 66 |
| <br>   |    |
| CONCLUSÕES GERAIS .....  | 69 |
| <br>   |    |
| APÊNDICES .....  | 71 |
| APÊNDICE A .....   | 72 |
| TABELA 1: MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA OS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO..... | 72 |
| APÊNDICE B.....  | 75 |
| AFERIÇÃO DO APARELHO (LANDMAPPER ERM02).....                           | 75 |

## RESUMO

COSTA, Marcelo Marques, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2011. **Condutividade elétrica aparente do solo como ferramenta para agricultura de precisão em uma área sob Cerrado.** Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Co-Orientadores: Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Nerilson Terra Santos e Elton Fialho Reis.

A agricultura de precisão busca o manejo dos campos de forma a maximizar o lucro e reduzir os impactos ambientais. Para tanto, deve-se considerar a variabilidade espacial dos atributos que definem a produtividade das culturas agrícolas. O manejo considerando a variabilidade de propriedades do solo proporciona melhorias no gerenciamento de insumos, entretanto, um banco de dados espacial para essa finalidade necessita de um grande número de amostras de solo. Por esse motivo o mapeamento de atributos do solo por meio de amostras diretas não é a opção com melhor relação custo/benefício. Amostragens indiretas são preferíveis e a condutividade elétrica aparente do solo (CEa) é uma técnica com elevada aceitação em agricultura de precisão. Esse trabalho tem o objetivo de avançar nos conhecimentos a respeito dessa técnica, testando-a em uma condição de Cerrado. Para tanto, foi avaliada as condições de amostragem, a variabilidade espacial, temporal e a utilidade dessas informações para a agricultura de precisão. Os resultados revelam que na condição de amostragem com teor de água no solo mais elevada, a CEa mais se correlaciona com atributos do solo e menos se correlaciona com o teor de água no solo, sendo considerada a melhor condição de amostragem. A variabilidade espacial da CEa gerou quatro classes, quando utilizando o classificador Fuzzy c-means. Entretanto, um método de análise de amostras de solo no interior das classes combinou-as em apenas duas, que foram distintas para os atributos mais correlacionados com a CEa e que apresentaram forte dependência espacial. Esses atributos foram, potencial hidrogeniônico (pH), saturação por bases (V), acidez potencial (H+Al), ferro (Fe) e capacidade total de troca catiônica (T). A variabilidade temporal da CEa

foi avaliada por meio da análise de componentes principais. A componente que melhor descreveu a variabilidade temporal da CEa explicou 18 % da variabilidade total dos dados e apresentou dependência espacial. Essa componente correlacionou com a altitude, T e a condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes). Nesse estudo, a altitude foi considerada o atributo que mais influenciou a variabilidade temporal da CEa. Para as condições desse trabalho a CEa representou uma boa informação para análise indireta de importantes atributos do solo.

## ABSTRACT

COSTA, Marcelo Marques, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2011. **Apparent soil electrical conductivity as a tool for precision agriculture in an area under Cerrado.** Adviser: Daniel Marçal de Queiroz. Co - Advisers: Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Nerilson Terra Santos and Elton Fialho Reis.

Precision agriculture seeks the management of fields in order to maximize profit and reduce environmental impacts. For this, one must consider the spatial variability of the attributes that define the yield of agricultural crops. The management considering the variability of soil properties provides improvements in the management of inputs, however, a spatial database for this purpose requires a large number of soil samples. To map the soil attributes using direct samples generally is not the option most cost effective. Indirect samplings are preferable, and the apparent soil electrical conductivity (ECa) is a technique with high acceptance in precision agriculture. The objective of this work is to advance the knowledge about this technique by testing it in a Cerrado condition. Therefore, the sampling conditions, the spatial and temporal variability, and the usefulness these information for precision agriculture were evaluated. The results regarding the sampling condition show that when the soil moisture is higher, the ECa correlated most closely with soil attributes and correlated less with soil moisture and was considered to be the best condition for sampling. The spatial variability of ECa generated four classes when used the fuzzy c-means classifier. However, a method of analysis of soil samples within classes combined them in just two, which were distinct for the attributes most correlated with the ECa and the obtained semivariogram showed low discontinuity at the origin. These attributes were the potential of hydrogen (pH), base saturation (V), potential acidity (H + Al), iron (Fe) and full cation exchange capacity (T). The temporal variability of ECa was analyzed by using the principal component technique. The component that best described the temporal variability of ECw explained 18% of the total variability of the data and presented spatial dependence. This component was correlated with altitude, T and electrical conductivity of saturation extract

(CEes). In this study the altitude was considered the attribute that most influenced the temporal variability of the ECa. In this study case, the ECa represented a good information for analysis of spatial variability of physical and chemical attributes of soil.

## INTRODUÇÃO GERAL

Os agricultores têm almejado o equilíbrio entre maiores índices produtivos e menores custos de produção, sem agredir ao meio ambiente. Para atender a esses requisitos, torna-se necessário aderir aos avanços tecnológicos que possibilitam um melhor gerenciamento do campo. A agricultura de precisão tem como filosofia a sustentabilidade e a lucratividade, e vem se aprimorando com os avanços tecnológicos (SILVA *et al.*, 2011). Tem-se como princípio a não homogeneidade dos campos, que resulta em diferentes produtividades quando se adota um manejo uniforme em áreas com o mesmo potencial produtivo. A proposta da agricultura de precisão consiste em manejar o campo levando em consideração a variabilidade espacial do sistema de produção. Bons resultados para esse conceito têm sido observados quando os fatores determinantes dessa variabilidade são relacionados ao solo. Atributos de fertilidade do solo são facilmente manejáveis e respondem melhor à produtividade das culturas. Atributos não alteráveis, como textura e topografia, são bons critérios para definir a variabilidade do potencial produtivo dos campos (OLIVER *et al.*, 2010). Entretanto, um banco de dados espaciais necessita de um grande número de amostras de solo, que implica em maior necessidade de mão-de-obra e resulta em custo elevado. O viés da relação custo/benefício tem forçado os adeptos da agricultura de precisão a desenvolver tecnologias que proporcionem um menor custo na aquisição de informações relevantes (MORAL *et al.*, 2010).

Os adeptos da agricultura de precisão tem se interessado pela amostragem de atributos que se correlacionam indiretamente com as propriedades do solo que têm interesse agrônomico. A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) tem se destacado como um método bem-sucedido de avaliar com rapidez, alta resolução e baixo custo, a condição geral de fertilidade do solo (SUDDUTH *et al.* 2005). Ela resulta da complexa influência mútua de atributos do solo e está associada a suas propriedades físico-químicas (MORAL *et al.*, 2010). Em razão de sua correlação com atributos determinantes da produtividade, a CEa tem sido

utilizada para estratificar o campo em zonas mais homogêneas para o manejo diferenciado (JOHNSON E RICHARD, 2003; CASTRIGNANÒ *et al.*, 2006; MORARI *et al.*, 2009).

Os aparelhos de mensuração da CEa do solo utilizam os princípios da resistividade elétrica (RE), da indução eletromagnética (IEM) ou da reflectometria no domínio do tempo (TDR). O último não é utilizado para mapeamento dos campos devido a sua complexidade e custo elevado. A IEM apresenta algumas vantagens operacionais em relação à RE, principalmente em solos secos e pedregosos. Nesse princípio os aparelhos deslizam sobre o solo, enquanto a RE necessita da penetração de eletrodos. A vantagem do princípio da RE consiste na facilidade de ajustar a profundidade de mensuração, por meio da alteração da configuração dos eletrodos. Já nos aparelhos de IEM, esse ajuste é complexo e bastante limitado (CORWIN E LESCH, 2003).

Sendo a CEa um indicativo de qualidade do solo, essa informação pode ser utilizada para planejamento da amostragem e delimitação de zonas para manejo diferenciado. Porém, devido a quantidade de variáveis que influenciam simultaneamente a CEa, interpretar os resultados pode não ser uma tarefa fácil. Corwin *et al.* (2003) relatam que os atributos de maior influência devem ser identificados em cada campo de produção.

A variação no teor de água do solo é um dos fatores que mais interferem nos resultados de CEa (RHOADES, 1996). Todavia, com o teor de água do solo homogêneo, a variação da CEa deve ser atribuída aos solutos dissolvidos e as propriedades físicas do solo. Rhoades *et al.* (1989), Corwin e Lesch (2003) e Corwin *et al.* (2003) recomendam que a CEa seja mensurada quando o solo estiver próximo de sua capacidade de campo. Nessa situação, o teor de água apresenta-se mais homogêneo e a CEa se aproxima da condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes).

A quantidade de solutos dissolvidos na solução do solo pode ser utilizada como indicativo de fertilidade. Entretanto, uma maior quantidade de solutos não necessariamente significa que o solo seja fértil. Isso porque os mesmos devem estar em equilíbrio, de tal forma que favoreça o desenvolvimento das culturas. O mapeamento da variabilidade espacial da CEa pode auxiliar no manejo de fertilizantes e corretivos, racionalizando o uso desses insumos.

O mapeamento da variabilidade espacial de um atributo é possível por meio de técnicas de geoestatística. A variância de pares de pontos é modelada em função da distância entre os mesmos nos chamados variogramas ou semivariogramas. Segundo Moral *et al.* (2010), os variogramas descrevem a diminuição da autocorrelação entre pares de pontos no

espaço, com o aumento da distância de separação entre eles. A fração da variância, que independe da distância de separação e representa a descontinuidade na origem é denominada efeito pepita, sendo provocada por efeitos aleatórios. A relação entre a variância dependente da distância de separação e o patamar alcançado no semivariograma, é representada pelo índice de dependência espacial. Assim, quanto maior o índice maior será a dependência espacial da variável (ZIMBACK, 2001). O atributo que não apresenta dependência espacial, seu variograma representa somente o efeito pepita, ou efeito pepita puro. Isso não significa necessariamente que o valor do atributo seja constante no campo, pois o mesmo pode apresentar uma elevada variabilidade. Todavia, essa variabilidade é atribuída a fatores aleatórios que independem da espacialização. Nessas condições, o manejo do campo a partir da média do atributo torna-se o método mais coerente. A aplicação de insumos a taxa variada em uma escala detalhada do terreno, torna-se mais apropriada quando o atributo apresenta uma forte dependência espacial, sendo possível gerar mapas com elevada precisão. A precisão dos mapas está associada a um maior número de amostras e isso pode não ser economicamente viável quando os mapas são provenientes de amostragem direta de solo. Nessas condições, escalas menos detalhadas do terreno são preferíveis para o manejo, surgindo a necessidade de estratificar o campo em zonas mais homogêneas (FLEMING *et al.*, 2000).

As zonas de manejo representam sub-regiões nas quais os valores de um atributo pertencentes a uma classe são mais semelhantes entre si, que aos membros de outras classes (LARK 1998). Diferentes zonas de manejo podem ser geradas para diferentes atributos. Várias abordagens têm sido sugeridas para definição de zonas de manejo, mas, segundo Guastaferrero *et al.* (2010), nenhuma metodologia é aceita de forma inequívoca. Os mesmos autores afirmam que a teoria dos conjuntos Fuzzy para agrupamento, tem possibilitado melhor descrever fenômenos que apresentam variação contínua, como é o caso de atributos do solo.

Segundo Odeh *et al.* (1992), o método de classificação Fuzzy c-means é preferível para o agrupamento de atributos do solo que apresentam continuidade espacial. Mapas de CEa podem ser gerados a partir de amostragem muito densa, o que permite detectar variabilidades do solo em diferentes escalas. Devido a sua associação com atributos que definem a fertilidade do solo, o agrupamento da CEa em classes mais homogêneas, pode ser útil ao manejo das culturas. Entretanto, não se sabe *a priori* o número mais apropriado de classes a serem definidas, mas pode-se assumir como referência o Índice de Performance Fuzzy (FPI) e a Entropia de Partição Modificada (MPE). O FPI fornece um indicativo da coesão entre as

classes geradas e a MPE fornece a quantidade de desordem nas mesmas. O melhor número de classes será aquele que minimiza os dois índices (ODEH *et al.*, 1992). Entretanto, a CEa do solo é determinada pela interação simultânea de vários atributos. Sendo assim, atributos correlacionados a CEa podem não se diferenciar para todas as classes definidas.

Um pequeno número de amostras pode ser coletado no interior das classes de CEa sem grandes custos ao agricultor (TAYLOR *et al.*, 2007). Os valores médios dos atributos podem ser comparados entre as classes por um teste de hipótese. Como se trata de um pequeno número de amostras que não apresentam um delineamento experimental, o teste t de Student é o método mais apropriado para comparar os contrastes formados pelas combinações das classes (TAVARES, 2007). Classes de CEa que apresentam médias estatisticamente iguais para um atributo do solo não necessitam ser manejadas de forma diferenciada.

Outra informação que pode ser explorada, consiste na análise da variabilidade temporal da CEa. O solo representa um meio dinâmico que está em constante transformação. Algumas propriedades podem se alterar durante o ciclo das culturas e o monitoramento do solo fornece informações relevantes para o manejo dos mesmos. A CEa é influenciada pelo conteúdo de sais presentes na solução do solo e sua variabilidade temporal pode ser um bom indicativo da dinâmica das cargas. Esse conhecimento é importante no planejamento da aplicação de fertilizantes com elevada mobilidade (TREMBLAY *et al.*, 2011). Algumas variáveis são normalmente associadas ao transporte de nutrientes, tais como capacidade de troca catiônica, textura do solo e atributos topográficos, como altitude e declividade, além de fatores meteorológicos (KUMHÁLOVÁ *et al.*, 2011).

A facilidade no mapeamento da CEa a torna uma ferramenta importante para o monitoramento de atributos correlacionados. O monitoramento da CEa durante o ciclo da cultura, considerando uma mesma condição de teor de água do solo, pode apresentar uma parte de sua variância que é devido ao dinamismo das cargas do solo, proporcionado pela movimentação de água no mesmo. A topografia do terreno também influencia a condutividade hidráulica sendo determinante no conteúdo de água e sua movimentação no solo (SCHMIDT *et al.*, 2007) e no transporte de nutrientes (SILVA E ALEXANDRE, 2005).

A variabilidade temporal da CEa deve refletir a dinâmica das cargas do solo e pode apresentar estrutura de dependência espacial. Caso isso ocorra, é recomendável investigar os atributos do solo associados à movimentação de água e ao transporte de nutrientes, como possíveis responsáveis por esse processo. O conhecimento de regiões onde as perdas de nutrientes são maiores é útil para definir zonas com maior risco de perdas de fertilizantes por

lixiviação e erosão (KUMHÁLOVÁ *et al.*, 2011). Para que isso seja possível, é necessário decompor a variabilidade da CEa, coletada em diferentes datas durante o ciclo da cultura, e identificar a porção de sua variância que é função de suas alterações no tempo. Isso pode ser obtido por meio da análise de componentes principais.

A análise de componentes principais consiste em uma técnica multivariada capaz de condensar as fontes de variabilidade de um conjunto de variáveis correlacionadas, identificando combinações lineares ortogonais, apresentadas como novas variáveis (MORAL *et al.*, 2010). As componentes geradas a partir do monitoramento da CEa do solo pode representar a variabilidade espacial, temporal, além de fontes de variação aleatória. Segundo Li *et al.* (2008), o número de componentes principais geradas equivale ao número de variáveis analisadas, mas geralmente a maior parte da variabilidade total dos dados é explicada pelos primeiros componentes. Identificando a componente que define a variabilidade temporal da CEa e este apresentando dependência espacial, é possível estratificá-lo em zonas mais homogêneas que podem estar associadas a dinâmica das cargas do solo.

A CEa representa uma ferramenta de amplo potencial para a agricultura de precisão. Sua variabilidade espacial e temporal pode fornecer informações relevantes ao manejo das culturas. Entretanto, deve-se atentar as condições de amostragem e a interpretação dos valores obtidos em campo. Para avançar no entendimento das relações entre os atributos do solo e a CEa, analisou-se o comportamento dessas variáveis em uma área de produção de milho e soja, localizada no Cerrado brasileiro.

## **OBJETIVOS**

O objetivo desse trabalho foi analisar a variabilidade espacial e temporal da condutividade elétrica aparente do solo, visando ao manejo de uma área sob Cerrado.

Os objetivos específicos foram:

- Analisar as correlações entre a condutividade elétrica aparente e atributos físico-químicos do solo, considerando a influência da variabilidade do teor de água do solo.
- Desenvolver um método para definir zonas de manejo a partir da condutividade elétrica aparente do solo.
- Analisar a variabilidade temporal da condutividade elétrica aparente e identificar os atributos do solo determinantes nesse processo.

## **JUSTIFICATIVA**

O interesse em realizar esse trabalho refere-se à necessidade de aprimorar métodos de amostragem de atributos indiretamente correlacionados às propriedades do solo relevantes no manejo das culturas. A análise e amostragem de amostras diretas de solo representa um custo elevado para o agricultor, além disso, um número reduzido de amostras pode gerar mapas pouco confiáveis. A CEa é sensível à variabilidade de atributos que determinam a capacidade do solo em conduzir corrente elétrica, sendo muitos desses atributos importantes para o manejo das culturas. Entretanto, é difícil generalizar sua aplicação, pois os atributos que mais influenciam os valores de CEa não são os mesmos para todos os campos de produção. A região de cerrado representa um grande centro de produção agrícola e possui um solo com características peculiares, sendo necessário mais estudos sobre a CEa nessa região.

O potencial de utilização da CEa consiste no menor custo de aquisição dos dados, elevada capacidade operacional dos equipamentos de medição e por estar associada a vários atributos de importância agrônômica. Entretanto, é preciso compreender melhor essa ferramenta para estabelecer uma aplicabilidade da informação por ela obtida. Esse trabalho procura contribuir com as pesquisas sobre CEa do solo na região de cerrado, como ferramenta para agricultura de precisão.

## **CONTEÚDO DO TRABALHO**

A organização desse trabalho consiste em uma introdução geral, os objetivos e justificativa do trabalho, três capítulos no formato de artigos científicos, conclusão geral e apêndices. Os itens introdução geral, objetivos e justificativa já foram abordados e apresentam o tema de estudo e informações necessárias para melhor compreensão do trabalho.

O capítulo 1 consiste em analisar as correlações entre a CEa e os atributos do solo, considerando a variabilidade do teor de água do solo para diferentes datas de amostragem durante o ciclo da cultura. Nesse capítulo, propõe-se determinar uma condição em que a CEa encontra-se mais correlacionada com atributos físico-químicos do solo e menos correlacionada com o teor de água do solo.

No capítulo 2 é abordado a criação de zonas de manejo a partir do mapa interpolado de CEa. Os atributos do solo correlacionados a CEa são analisados para cada zona gerada e um método é proposto para unir zonas cujos atributos apresentam médias iguais. Isso é feito com

o intuito de gerar zonas de manejo para atributos do solo a partir de zonas de CEa, para os atributos em que isso seja possível.

O capítulo 4 apresenta uma análise temporal da CEa, partindo do pressuposto que a variação da CEa no tempo pode refletir a variação das cargas do solo proporcionadas pela movimentação de solutos. Esse capítulo visa identificar regiões com maior risco de perdas de fertilizantes por lixiviação e os atributos determinantes nesse processo.

O item conclusão geral aborda as conclusões dos três capítulos, resumido os mesmos com enfoque nos objetivos inicialmente propostos. O último item é o Apêndice, que é subdividido em Apêndice A e Apêndice B. No Apêndice A encontram-se as correlações entre todos os atributos analisados nesse trabalho. No Apêndice B, é descrito o aparelho portátil utilizado nesse para medir a CEa do solo, e é apresentado o resultado da comparação do mesmo com um condutivímetro de laboratório.

## LITERATURA CITADA

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

CASTRIGNANÒ, A., MORARI, F., MORELLI, G. Assessment of Spatial Relationship Between Some Soil Properties and Electromagnetic Induction Scans. In **[CD-ROM] Proceeding: XVI CGR world congress**, Agricultural engineering for a better world, Bonn (pp. 1-6). Dusseldorf, Germany: VDI Verlag GmbH, 2006.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 455-471, 2003.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M.; OSTER, J. D.; KAFFKA, S. R. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 2, p. 352-364, 2003.

FLEMING, K. L.; WESTFALL, D. G.; WIENS, D. W.; BRODAHL, M. C. Evaluating Farmer Defined Management Zone Maps for Variable Rate Fertilizer Application. **Precision Agriculture**, v. 2, n. 2, p. 201-215, 2000.

GUASTAFERRO, F.; CASTRIGNANÒ, A.; DE BENEDETTO, D.; SOLLITTO, D.; TROCCOLI, A.; CAFARELLI, B. A comparison of different algorithms for the delineation of management zones. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 6, p. 600-620, 2010.

JOHNSON, R.M., RICHARD, E.P. Evaluation of crop and soil spatial variability in Louisiana sugarcane production systems. **Precision Agriculture** [CD-ROM]. Proceedings of the 6th International Conference Minneapolis, MN: ASA, CSSA, and Madison, WI: SSSA, 2003.

KUMHÁLOVÁ, J.; KUMHÁLA, F.; KROULÍK, M.; MATĚJKOVÁ, S. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. **Precision Agriculture**, p. 1-18, 2011.

LARK, R. M. Forming spatially coherent regions by classification of multi-variate data: an example from the analysis of maps of crop yield. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 12, n. 1, p. 83 - 98, 1998.

LI, Y.; SHI, Z.; LI, F.; LI, H. Y. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 56, n. 2, p. 174-186, 2008.

SILVA, J. R. M. DA; ALEXANDRE, C. Spatial variability of irrigated corn yield in relation to field topography and soil chemical characteristics. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 5, p. 453-466, 2005.

MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; SILVA, J. R. M. D. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil and Tillage Research**, v. 106, n. 2, p. 335-343, 2010.

MORARI, F.; CASTRIGNANÒ, A.; PAGLIARIN, C. Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geo-electrical sensors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 68, n. 1, p. 97-107, 2009.

ODEH, I. O. A.; MCBRATNEY, A. B.; CHITTLEBOROUGH, D. J. Soil pattern recognition with fuzzy-c-means: application to classification and soil-landform interrelationships. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 2, p. 505-516, 1992.

OLIVER, Y. M.; ROBERTSON, M. J.; WONG, M. T. F. Integrating farmer knowledge, precision agriculture tools, and crop simulation modelling to evaluate management options for poor-performing patches in cropping fields. **European Journal of Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 40-50, 2010.

RHOADES, J. D. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. **Soil Science Society of America**, Book ., n. PART 3, p. 417-435, 1996.

RHOADES, J. D.; MANTEGHI, N. A.; SHOUSE, P. J.; ALVES, W. J. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 2, p. 433-439, 1989.

SCHMIDT, J. P.; HONG, N.; DELLINGER, A.; BEEGLE, D. B.; LIN, H. Hillslope variability in corn response to nitrogen linked to in-season soil moisture redistribution. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 1, p. 229-237, 2007.

SILVA, C.; MORAES, M. DE.; MOLIN, J. Adoption and use of precision agriculture technologies in the sugarcane industry of São Paulo state, Brazil. **Precision Agriculture**, v. 12, n. 1, p. 67-81, 2011.

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**, v. 46, n. 1-3 SPEC. ISS., p. 263-283, 2005

TAVARES, M.; **Estatística Aplicada à Administração**; Sistema Universidade Aberta do Brasil. 2007, 142 p.

TAYLOR, J. A.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. Establishing management classes for broadacre agricultural production. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 5, p. 1366-1376, 2007.

TREMBLAY, N.; BOUROUBI, M. Y.; VIGNEAULT, P.; BÉLEC, C. Guidelines for in-season nitrogen application for maize (*Zea mays* L.) based on soil and terrain properties. **Field Crops Research**, 2011.

## **CAPÍTULO 1**

### **EFEITO DO TEOR DE ÁGUA NA RELAÇÃO ENTRE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE E ATRIBUTOS DO SOLO**

#### **RESUMO**

A agricultura de precisão busca identificar a heterogeneidade dos campos de produção para manejá-los de forma diferenciada. Para isso é necessário uma amostragem intensa de atributos que fornecem informações agronômicas relevantes. A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) vem sendo utilizada em agricultura de precisão, por apresentar baixo custo de aquisição dos dados, elevado rendimento operacional e por estar associada ao potencial produtivo dos campos. Entretanto, a CEa é bastante influenciada pelo conteúdo de água no solo e a variabilidade desse atributo pode reduzir a confiabilidade dos mapas gerados. O objetivo desse trabalho foi estabelecer uma condição de amostragem que maximize as correlações entre a CEa e atributos do solo. Os resultados mostraram que o teor de água médio do solo, amostrado em diferentes datas foi correlacionado com a CEa média, para um mesmo campo. O momento ideal para amostragem de CEa ocorreu quando o teor de água médio do solo foi mais elevado. Nessa condição o coeficiente de variação para o teor de água do solo foi menor e não houve correlação entre a CEa e o teor de água do solo. O critério proposto para definir a confiabilidade dos dados de CEa foi a não correlação com o teor de água do solo. Nessa condição a CEa foi mais correlacionada com atributos do solo, principalmente pH e porcentagem de saturação de bases (V%).

**Palavras-chave:** Teor de água no solo, variabilidade espacial, agricultura de precisão.

#### **EFFECT OF THE WATER CONTENT ON THE RELATIONSHIP BETWEEN APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND SOIL ATTRIBUTES**

##### **ABSTRACT**

The objective of the precision agriculture is to identify the variability of production fields and to manage them based on this variability. This requires an intensive sampling of attributes that provide relevant agronomic information. The apparent soil electrical conductivity has been used in the precision agriculture, because of its low cost of data acquisition, yield operational high and it is associated by the productive potential of the fields.

However, ECa is strongly influenced by soil water content and variability of this attribute can reduce the reliability of maps generated. The objective of this study was to establish a sampling condition that maximizes the correlations between ECa and soil attributes. The results showed that the average soil water content sampled on different dates was correlated with ECa average for the same field. The ideal time to sampled of ECa occurred when the average soil water content was higher. In this condition the coefficient of variation for soil water content was lower and there was no correlation between ECa and soil water content. The proposed criteria to define the reliability of ECa data was the not to correlate with soil water content. Under this condition ECa was more correlated with soil properties, mainly pH and base saturation percentage (V%).

**Key words:** water content in soil, spatial variability, precision agriculture.

## INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão pressupõe o manejo das culturas considerando sua heterogeneidade espacial e para isso grande número de amostras é necessário para modelar a variabilidade dos campos. O custo de aquisição da análise de solo limita amostragens mais densas e isso pode resultar em mapas menos precisos. Portanto, amostragem indireta, por meio de atributos correlacionados às variáveis de interesse agrônomo, é preferível desde que seja de menor custo de aquisição e apresente alto rendimento operacional. A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) tem sido amplamente aceita na agricultura de precisão, representando o método geofísico mais bem-sucedido atualmente para definir zonas de manejo (LÜCK *et al.*, 2009).

Em solos não salinos, a CEa é determinada pela interação entre atributos que determinam sua capacidade de conduzir eletricidade. Esses atributos relacionam-se a produtividade das culturas agrícolas em diferentes níveis. Assim, a CEa do solo representa uma ferramenta com grande potencial para agricultura de precisão (SHANER *et al.*, 2008; LÜCK *et al.*, 2009). Entretanto, segundo Lück *et al.* (2009), a influência de diferentes teores de água no solo torna as medidas de CEa pouco confiáveis.

Ekwue e Bartholomew (2010) observaram em seus experimentos uma forte correlação positiva entre a CEa e o teor de água do solo, para três tipos de solo avaliados em laboratório e em observações de campo. No Centro-Oeste dos Estados Unidos, Brevik *et al.* (2006)

monitoraram a CEa e o teor de água volumétrica do solo no período de junho de 1999 a outubro de 2000 e concluíram que a CEa é fortemente influenciada pelo teor de água do solo. Os mesmos autores afirmam que o teor de água do solo deve ser considerado na investigação da CEa e registrado nos relatórios gerados. Isso sugere que a variabilidade do teor de água do solo em diferentes coletas, induz a uma variabilidade nos mapas de CEa que não é devido aos atributos do solo e sim da variação do teor de água, o que pode proporcionar uma baixa repetibilidade das medições. Dessa forma, a comparação de mapas de CEa coletada em diferentes condições do teor de água pode não fornecer informações confiáveis.

O conteúdo de água do solo varia no tempo e espacialmente. A variabilidade do teor de água em um campo pode ser a causadora da maior parte da variabilidade da CEa. Assim, se no momento de amostragem da CEa o teor de água do solo apresentar uma grande variabilidade, os valores de CEa obtidos pode estar pouco correlacionada com atributos do solo. Segundo Lück *et al.* (2009), o teor de água do solo afeta tanto o nível quanto a faixa de variação dos valores de CEa, e para gerar mapas confiáveis de CEa é necessário desenvolver um sistema de múltiplos sensores capazes de ajustar a CEa medida com diferentes teores de água no solo.

Rhoades *et al.* (1989) sugeriram que a CEa deve ser avaliada quando o solo estiver com um conteúdo de água próximo ao de sua capacidade de campo, nessa situação o valor da CEa mais se aproxima da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes). Os autores afirmam que nessa condição o conteúdo de água do solo apresenta-se mais homogêneo, ou seja, com uma menor variabilidade na área em estudo. Entretanto, é difícil saber se no momento da amostragem o teor de água do solo está suficientemente próximo da capacidade de campo. Outro problema é que o plantio de soja e milho inicia-se logo que haja teor de água no solo suficiente para a germinação das sementes. Isso acontece principalmente em regiões cujo período chuvoso permite duas safras anuais, sendo necessário iniciar o plantio o mais rápido possível. Após o plantio, equipamentos de medição da CEa com alta capacidade operacional, tal como o 'Veris 3100', tem seu acesso restrito devido ao amassamento de plantas. Com a cultura implantada, a CEa pode ser medida com aparelhos portáteis que necessita apenas de um operador andando no campo, porém esses aparelhos apresentam menor rendimento operacional.

A hipótese desse trabalho é que o teor de água do solo é um fator determinante da CEa, entretanto, quando o valor médio do teor de água é elevado, sua variabilidade no campo é menor. Sendo assim, a CEa medida em uma condição de teor de água do solo mais elevada,

deve apresentar menor correlação com o teor de água, sendo mais correlacionada com os atributos físico-químicos do solo que definem a quantidade total de cargas disponíveis. O objetivo desse trabalho consiste em definir um critério para amostragem de CEa em que a mesma seja mais correlacionada como atributos físico-químicos do solo.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Descrição da área de estudo**

A área de estudo foi um talhão da fazenda “Andréia ou Sozinha”, localizada no município de Goianápolis, no Estado de Goiás, Centro Oeste do Brasil. A sede da fazenda encontra-se nas coordenadas 16°28’20” Sul e 49°00’32” Oeste. Segundo a classificação de Köppen (1928), o clima da região é do tipo Aw tropical úmido, caracterizado pelo inverno seco e o verão chuvoso. O município encontra-se a 1060 m de altitude, e a precipitação média anual varia entre 1200 a 1800 mm (GOIÁS, 2010). O solo no local de estudo é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo. No ano agrícola 2009/2010, a área foi cultivada com milho e no ano agrícola 2010/2011 foi cultivada com soja.

### **Coleta de dados**

A delimitação da área experimental foi realizada com o auxílio de um GPS Topográfico da Marca Magellan, modelo Promark 3. Foi realizada a correção diferencial pós-processada utilizando a base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), localizada em Brasília. O Sistema de Informações Geográficas (SIG) utilizado foi o ArcGIS (Versão 9.3, da ESRI Inc., Redlands, CA, EUA). Com auxílio do SIG foi criada uma malha regular de pontos no interior da área de estudo, onde foram determinados os valores de CEa, o teor de água no solo e coletadas as amostras de solo conforme apresentado na Figura 1. O GPS foi utilizado para localização dos pontos amostrados em campo. A malha de pontos amostrados apresentou uma densidade de dois pontos por hectare em uma área de 75 hectares, perfazendo um total de 150 pontos.

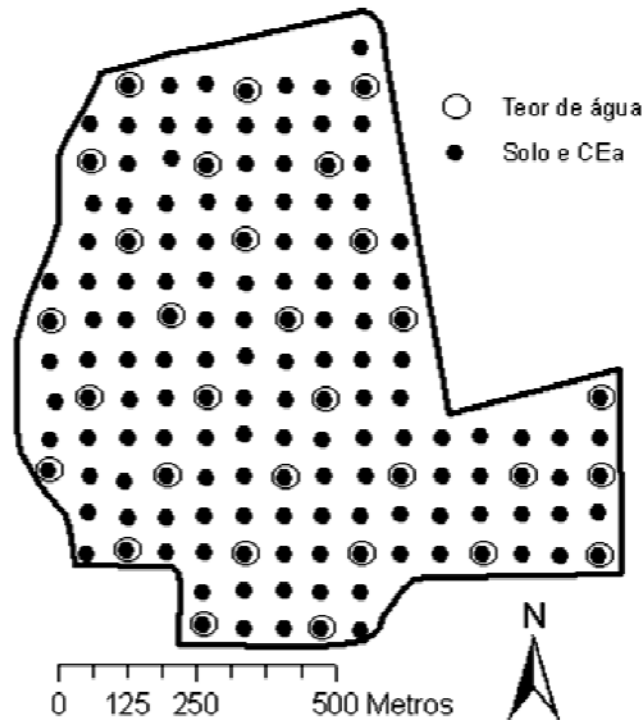


Figura 1: Pontos onde foram coletadas amostras de solo (todos os pontos), CEa (todos os pontos) e teor de água no solo (somente círculos maiores).

Os dados de CEa do solo foram amostrados nos dias 11/11/2010 (P1), 23/11/2010 (P2), 04/12/2010 (P3), 13/12/2010 (P4) e 26/01/2011 (P5) utilizando um aparelho portátil fabricado por Landviser, modelo LandMapper® ERM 02. O aparelho foi comparado com um condutivímetro de bancada, apresentando coeficiente de correlação  $r = 0,98$  (Apêndice B). O LandMapper® ERM 02 utiliza o princípio da resistividade elétrica (RE), que é medida por meio do contato de quatro eletrodos com o solo. A configuração dos eletrodos utilizada foi a *Matriz de Wenner*, ajustada de tal forma que as leituras representem a camada de 0 a 0,20 m de profundidade. Nessa configuração, os eletrodos são dispostos em linha e igualmente espaçados segundo descrito por Corwin e Lesch (2003). Cada ponto foi representado pela média de cinco determinações coletadas aleatoriamente a uma distância de até 5 m do ponto. Para cada data de amostragem de CEa, 30 amostras de solo foram recolhidas na camada de 0 a 0,20 m, pesadas e levadas a estufa de ventilação forçada a uma temperatura de 105° onde permaneceram até atingir peso constante, sendo determinado o teor de água do solo.

As amostras de solo para análises químicas e físicas foram coletadas com auxílio de um trado de rosca, na profundidade de 0 a 0,20 m. Cada amostra foi composta por dez subamostras, coletadas a uma distância de até cinco metros do ponto. Na análise química

foram determinados o pH, a acidez potencial ( $H + Al$ ), os teores de Ca, Mg, K, P, Al, P-rem, o teor de matéria orgânica, a soma de bases (SB), a capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva (t) e a CTC total (T), a saturação por bases (V), o índice de saturação de alumínio, e os teores de Zn, Fe, Mn e Cu. Quanto a análise física foi determinada a textura do solo, quantificando os teores de Argila, Silte e Areia total.

## **Análise de dados**

### Análise exploratória dos dados

Foi realizada a análise exploratória dos dados para o estudo preliminar da distribuição estatística dos atributos do solo, não considerando a distribuição espacial. Foram calculados os parâmetros: média, desvio padrão, valor máximo e mínimo e coeficiente de variação (CV). Essa análise permite avaliar de forma geral, a condição de fertilidade do solo, caracterizando-a segundo os valores médios de seus atributos físicos, químicos e físico-químicos.

### Análise de correlação

A análise de correlação de Pearson foi utilizada para testar as hipóteses desse trabalho, sendo realizada por meio do programa SAS versão 9.2 (SAS Institute, 2008). Avaliou-se a correlação existente entre os valores médios de CEa e os valores médios do teor de água do solo, utilizando as cinco datas de amostragem. Essa análise foi realizada para avaliar a hipótese da existência de correlação entre o valor médio de CEa e o valor médio do teor de água do solo, considerando toda a área de estudo. Para avaliar se o teor de água do solo apresentou uma maior variabilidade no campo quando as amostras foram coletadas em condição de menor teor de água, foi realizada a análise de correlação entre os valores médios de teor de água e seus respectivos CV, considerando as cinco datas de coletas.

Em cada uma das cinco datas de amostragem de CEa os locais onde foram determinados o teor de água do solo coincidiram com os locais onde foram coletadas amostras de solo e CEa. Assim, para cada data tem-se 30 amostras do teor de água no solo, pareadas a 30 amostras de CEa. Dessa forma, foi possível realizar a análise de correlação entre a CEa e o teor de água do solo, para cada data de amostragem. Isso, para testar a hipótese de que uma menor correlação entre a CEa e o teor de água do solo ocorre quando o teor médio de água no solo é mais elevado. A hipótese de que a CEa apresenta-se mais correlacionada com atributos

do solo, quando for menos correlacionada com o teor de água do solo foi avaliada pela correlação entre os atributos do solo e a CEa nas diferentes datas.

## RESULTADOS

A análise descritiva dos atributos do solo é apresentada na Tabela 1. O solo foi amostrado no início do período chuvoso, destacando-se os baixos valores de T e matéria orgânica (MO) em contraste com uma elevada V e um pH médio próximo do neutro. Pode-se observar também que os atributos de textura argila e areia apresentam uma reduzida variabilidade no campo, expressa pelo baixo valor do coeficiente de variação.

Tabela 1: Estatísticas descritivas para os atributos do solo avaliados

| Variável         | Unidade                 | Média | Desvio padrão | Mínimo | Máximo | CV(%) |
|------------------|-------------------------|-------|---------------|--------|--------|-------|
| PH               |                         | 6,74  | 0,30          | 5,80   | 7,30   | 4,41  |
| P                | mg. dm <sup>-3</sup>    | 6,70  | 3,63          | 1,70   | 18,40  | 54,12 |
| K                | mg. dm <sup>-3</sup>    | 52,20 | 14,12         | 24,00  | 108,00 | 27,04 |
| Ca <sup>2+</sup> | cmolc. dm <sup>-3</sup> | 3,24  | 0,44          | 1,90   | 4,20   | 13,70 |
| Mg <sup>2+</sup> | cmolc. dm <sup>-3</sup> | 0,83  | 0,12          | 0,60   | 1,20   | 15,12 |
| Al <sup>3+</sup> | cmolc. dm <sup>-3</sup> | 0,00  | 0,00          | 0,00   | 0,00   | 0,00  |
| H + Al           | cmolc. dm <sup>-3</sup> | 1,70  | 0,90          | 0,33   | 5,61   | 52,61 |
| SB               | cmolc. dm <sup>-3</sup> | 4,20  | 0,53          | 2,63   | 5,24   | 12,56 |
| t                | cmolc. dm <sup>-3</sup> | 4,20  | 0,53          | 2,63   | 5,24   | 12,56 |
| T                | cmolc. dm <sup>-3</sup> | 5,90  | 0,84          | 4,17   | 9,89   | 14,32 |
| V                | %                       | 72,13 | 11,05         | 37,00  | 93,00  | 15,32 |
| MO               | dag. kg <sup>-1</sup>   | 3,04  | 0,30          | 2,50   | 4,30   | 9,73  |
| P <sub>rem</sub> | mg. L <sup>-1</sup>     | 17,45 | 3,37          | 9,50   | 27,40  | 19,30 |
| Zn               | mg. dm <sup>-3</sup>    | 3,73  | 2,21          | 1,50   | 19,90  | 59,28 |
| Cu               | mg. dm <sup>-3</sup>    | 1,33  | 0,60          | 0,80   | 6,70   | 45,02 |
| Fe               | mg. dm <sup>-3</sup>    | 21,97 | 5,58          | 11,00  | 41,10  | 25,41 |
| Mn               | mg. dm <sup>-3</sup>    | 26,89 | 9,05          | 13,70  | 66,70  | 33,67 |
| B                | mg. dm <sup>-3</sup>    | 0,26  | 0,09          | 0,10   | 0,50   | 34,36 |
| S                | mg. dm <sup>-3</sup>    | 11,38 | 2,39          | 6,60   | 25,60  | 21,04 |
| Argila           | %                       | 32,97 | 3,28          | 26,00  | 43,00  | 9,95  |
| Silte            | %                       | 10,64 | 2,98          | 6,00   | 20,00  | 28,00 |
| Areia            | %                       | 56,38 | 4,40          | 45,00  | 65,00  | 7,81  |
| CEes             | μS. cm <sup>-1</sup>    | 72,45 | 11,54         | 49,42  | 106,30 | 15,93 |

pH - potencial hidrogeniônico (1:2,5); P - fósforo; K - potássio; Ca - Cálcio; Mg - Magnésio; Al - Alumínio; H + Al - Acidez potencial; SB - Soma de bases; t - Capacidade de troca catiônica efetiva; T - Capacidade de troca catiônica total; V - Saturação por bases; MO - Matéria orgânica; P-rem - Fósforo remanescente; Zn - Zinco; Cu - Cobre; Fe - Ferro; Mn - Manganês; B - boro; S - Enxofre; CEes - Condutividade elétrica do extrato de saturação (1:5). P - K - Fe - Zn - Cu - Mn - Extrator Mehlich 1; Ca - Mg - Al - Extrator KCl 1 mol/L; H+Al - Extrator Acetato de Calcio 0,5 mol/L pH 7,0

Para caracterizar as condições de teor de água durante as determinações da CEa, foram coletadas amostras de solo para análise do teor de água. Os valores médios de CEa e teor de água, bem como o CV para o teor de água foram calculados e são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores médios de teor de água do solo e CEa, amostrados em diferentes datas

| Data de amostragem | CEa Média (mS. m <sup>-1</sup> ) | Teor de água do solo |        |
|--------------------|----------------------------------|----------------------|--------|
|                    |                                  | Média (%)            | CV (%) |
| P1                 | 4,8                              | 20,5                 | 11,8   |
| P2                 | 5,9                              | 22,0                 | 9,6    |
| P3                 | 4,6                              | 20,1                 | 12,1   |
| P4                 | 4,2                              | 20,2                 | 12,3   |
| P5                 | 2,6                              | 18,0                 | 17,2   |

CV – Coeficiente de variação; CEa – condutividade elétrica aparente do solo.

O coeficiente de correlação entre os valores médios de CEa e os valores médios de teor de água foi de 0,989 e a probabilidade da correlação ser igual a zero foi menor que 0,001. Esse resultado mostra que na área em estudo, os maiores valores médios de CEa foram obtidos quando o teor de água média do solo foi maior e que existe uma forte correlação entre os dois atributos. Ekwue e Bartholomew (2010) obtiveram resultado semelhante ao avaliar as relações entre a CE e o teor de água, em condições de campo e laboratório, para três tipos de solo.

Quando avaliado, o coeficiente de correlação entre os valores médios de teor de água e seus respectivos CV, teve-se uma correlação significativa de -0,985. A correlação negativa indica que quando o teor de água foi mais elevado, sua variabilidade no campo foi menor. Assim, uma condição de maior homogeneidade para o teor de água do solo ocorreu para a amostragem do dia P2, que apresentou um maior teor de água do solo médio. Esse resultado está de acordo com os resultados obtidos por Rhoades *et al.*, (1989). Para cada data de amostragem, foi realizada uma análise de correlação entre o teor de água do solo e os valores de CEa amostrados nos mesmos locais e os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Análise de correlação entre a CEa e o teor de água do solo, para cada data de amostragem.

| Data | r    | p -valor |
|------|------|----------|
| P1   | 0,34 | 0,146    |
| P2   | 0,10 | 0,671    |
| P3   | 0,43 | 0,060    |
| P4   | 0,56 | 0,010    |
| P5   | 0,69 | 0,001    |

r – coeficiente de correlação; p - valor – probabilidade de aceitar  $H_0$  ( $r = 0$ ).

Se o objetivo for avaliar a distribuição da disponibilidade de água no solo com base em CEa, a amostragem realizada no dia P5, que apresentou um menor teor de água média do solo, seria a mais apropriada devido a elevada correlação entre a CEa e o teor de água do solo observada nessa data (Tabela 3). Isso se justifica, pois segundo Guastaferrero *et al.* (2010), os atributos do solo que têm maior efeito sobre a resposta das culturas de sequeiro são aqueles que controlam a capacidade de retenção de água e conseqüentemente sua disponibilidade, tais como textura, matéria orgânica e topografia do terreno e cobertura vegetal.

Os resultados apresentados na Tabela 3 indicam que o menor coeficiente de correlação entre o teor de água do solo e a CEa foi obtido para a amostragem do dia P2, que apresentou o maior valor médio de teor de água (Tabela 2). Esse resultado pressupõe que essa data apresente uma maior correlação com atributos do solo, pois a variabilidade do teor de água não deve estar influenciando a variabilidade da CEa.

As correlações existentes entre a CEa e os atributos físico e químicos do solo foram realizadas com os 150 pontos amostrados e os resultados são apresentados na Tabela 4. Todas as correlações possíveis entre os atributos avaliados, considerando os 150 pontos amostrados podem ser encontradas no Apêndice A.

Tabela 4: Análise de correlação entre a CEa amostrada em diferentes datas e atributos do solo.

| Variáveis             | P1 (U=20,5%)        | P2 (U=22%)          | P3(U=20,1%)         | P4(U=20,1%)         | P5(U=18%)           |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| pH                    | 0,29**              | 0,53**              | 0,39**              | 0,41**              | 0,45**              |
| P                     | -0,05 <sup>ns</sup> | -0,06 <sup>ns</sup> | -0,19*              | -0,15 <sup>ns</sup> | -0,09 <sup>ns</sup> |
| K                     | -0,03 <sup>ns</sup> | -0,08 <sup>ns</sup> | 0,03 <sup>ns</sup>  | 0,02 <sup>ns</sup>  | 0,07 <sup>ns</sup>  |
| Ca                    | 0,46**              | 0,44**              | 0,35**              | 0,39**              | 0,44**              |
| Mg                    | 0,49**              | 0,43**              | 0,42**              | 0,53**              | 0,50**              |
| H+Al                  | -0,14 <sup>ns</sup> | -0,45**             | -0,32**             | -0,30**             | -0,35**             |
| t                     | 0,50**              | 0,47**              | 0,40**              | 0,46**              | 0,49**              |
| T                     | 0,16 <sup>ns</sup>  | -0,19*              | -0,09 <sup>ns</sup> | -0,03 <sup>ns</sup> | -0,07 <sup>ns</sup> |
| V                     | 0,21**              | 0,52**              | 0,34**              | 0,37**              | 0,41**              |
| MO                    | 0,20**              | 0,04 <sup>ns</sup>  | 0,08 <sup>ns</sup>  | 0,15 <sup>ns</sup>  | 0,11 <sup>ns</sup>  |
| P_rem                 | -0,22**             | -0,32**             | -0,38**             | -0,34**             | -0,35**             |
| Zn                    | 0,23**              | 0,23**              | 0,13 <sup>ns</sup>  | 0,24**              | 0,27**              |
| Cu                    | -0,09 <sup>ns</sup> | 0,05 <sup>ns</sup>  | 0,06 <sup>ns</sup>  | 0,00 <sup>ns</sup>  | 0,02 <sup>ns</sup>  |
| Fe                    | -0,19*              | -0,39**             | -0,16*              | -0,17*              | -0,22**             |
| Mn                    | 0,05 <sup>ns</sup>  | 0,17*               | 0,22**              | 0,21**              | 0,13 <sup>ns</sup>  |
| SB                    | 0,50**              | 0,47**              | 0,40**              | 0,46**              | 0,49**              |
| B                     | 0,12 <sup>ns</sup>  | 0,11 <sup>ns</sup>  | 0,11 <sup>ns</sup>  | 0,1 <sup>ns</sup>   | 0,16 <sup>ns</sup>  |
| S                     | -0,1 <sup>ns</sup>  | -0,17*              | -0,13 <sup>ns</sup> | -0,14 <sup>ns</sup> | -0,11 <sup>ns</sup> |
| Altitude <sup>1</sup> | 0,30**              | -0,18*              | -0,07 <sup>ns</sup> | -0,02 <sup>ns</sup> | -0,03 <sup>ns</sup> |
| Argila                | 0,18*               | 0,17*               | 0,25**              | 0,24**              | 0,26**              |
| Silte                 | 0,11 <sup>ns</sup>  | 0,27**              | 0,19**              | 0,24**              | 0,21**              |
| Areia                 | -0,21*              | -0,30**             | -0,32**             | -0,34**             | -0,34**             |
| CEes                  | -0,14 <sup>ns</sup> | 0,29**              | 0,04 <sup>ns</sup>  | 0,08 <sup>ns</sup>  | 0,11 <sup>ns</sup>  |

pH - potencial hidrogeniônico (1:2,5); P - fósforo; K - potássio; Ca - Cálcio; Mg - Magnésio; H + Al - Acidez potencial; t - Capacidade de troca catiônica efetiva; T - Capacidade de troca catiônica total; V - Saturação por bases; MO - Matéria orgânica; P-rem - Fósforo remanescente; Zn - Zinco; Cu - Cobre; Fe - Ferro; Mn - Manganês; SB - Soma de bases; B - boro; S - Enxofre; CEes - Condutividade elétrica do extrato de saturação (1:5); <sup>1</sup> Altitude elipsoidal medida com GPS topográfico; U - Teor de água no solo ns - não significativo; \*\* - significativo a 1 % de probabilidade; \* - significativo a 5 % de probabilidade.

A data de amostragem P2 foi a que apresentou maior valor médio do teor de água do solo e não apresentou correlação significativa com o teor de água. Dos 23 atributos do solo avaliados, a CEa no dia P2 correlacionou-se significativamente com 18 deles. Para as demais datas, o maior número de correlações significativas entre a CEa e os atributos avaliados foram 14. O maior coeficiente de correlação (r) foi 0,53 e esse valor foi observado no dia P2 para a correlação entre a CEa e o pH e no dia P4 entre CEa e Mg. O segundo maior valor foi 0,52, também observado no dia P2 para a correlação entre as variáveis CEa e V. A CEa somente se correlacionou significativamente com a CEes e com a T no dia P2, concordando com os resultados apresentados por Rhoades *et al.* (1989). Em relação à altitude elipsoidal apresentada na Tabela 4, essa representa a posição relativa dos pontos na paisagem e a análise limita-se apenas a área de estudo, não sendo possível inferir sobre outras regiões.

## DISCUSSÃO

A análise descritiva dos atributos do solo mostra características típicas de solos de cerrados brasileiros, com baixos valores da capacidade de troca catiônica (T) e baixos valores de teor de matéria orgânica (MO). A elevada saturação por bases (V) é devido a aplicação de calcário como corretivo de acidez do solo, que por consequência apresenta um pH médio próximo do neutro. Nessas condições de baixa acidez, o Al é totalmente neutralizado e apresenta valor zero. Valores de pH elevados reduzem a disponibilidade de alguns micronutrientes, tais como Fe, Cu, Mn e Zn, sendo necessária adubações foliares para suprir as necessidades das plantas. Entretanto, a necessidade de se elevar a V a níveis tão elevados, deve-se a preocupação em fornecer um mínimo de Ca e Mg necessário ao desenvolvimento das plantas. Como o valor médio da T potencial é baixo, pequenos incrementos na SB representam uma grande porção da T e por esse motivo a V é elevada.

Os resultados dessa pesquisa reforçam a preocupação em registrar o teor de água do solo no momento de amostragem da CEa. Ainda não é possível com a tecnologia atual, discriminar os efeitos da variação do teor de água do solo nas medições de CEa (LÜCK *et al.*, 2009). Entretanto, em condições de teor de água médio elevado foi observado uma menor correlação do teor de água com a CEa. Esses resultados indicam que nessas condições a variabilidade da CEa é pouco influenciada pelo teor de água do solo. Rhoades *et al.* (1989) afirmam que uma maior homogeneidade do teor de água do solo acontece quando a mesma está próximo a capacidade de campo e que a CEa medida nessas condições mais se aproxima da CEes, sendo isso também observado nesse trabalho. Entretanto, o potencial matricial do solo, que define o seu conteúdo de água na capacidade de campo é influenciado pelas estruturas granulométricas. Isso significa que o teor de água do solo na capacidade de campo pode variar se a textura do solo for variável. Bernardo (1987) relata que as tensões do solo equivalente à capacidade de campo variam em função da textura e proporciona uma variação no teor de água do solo à capacidade de campo de 8% a 30%. Assim, em áreas cuja textura do solo apresenta uma alta variabilidade, o teor de água do solo em sua capacidade de campo deve acompanhar a variação da textura. Dessa forma, recomenda-se uma divisão inicial da área em sub-regiões cuja textura do solo seja mais homogênea.

Quando a variabilidade da textura no campo não for elevada, sua correlação com a CEa deve ser baixa ou mesmo nula e o teor de água do solo na capacidade de campo deverá a ser mais homogênea. A baixa variabilidade do teor de água nessas condições implica em uma

menor participação na variabilidade da CEa, sendo que o mapa gerado nessas condições deve ser considerado o mais confiável para associações com atributos químicos do solo. Em termos práticos é difícil saber se o teor de água no momento de amostragem está suficientemente alto. Para avaliar a confiabilidade do mapa de CEa sugere-se, que no momento da amostragem seja amostrado o teor de água do solo em alguns pontos representativos da área e que coincida com os locais de amostragem da CEa. Em seguida, realizar uma análise de correlação entre a CEa e o teor de água do solo. Fortes correlações indicam que o mapa de CEa gerado é influenciado pelo teor de água do solo e pode ser diferente para outras condições de teor de água.

Nesse trabalho, a amostragem de CEa que apresentou maior teor de água médio do solo foi o mais correlacionado com a saturação por bases. A saturação por bases representa um atributo de valor agrônômico, por ser uma base de cálculo para a recomendação de corretivos para neutralizar a acidez e o Al trocável do solo. Uma elevada correlação entre a CEa e a V é um bom argumento para a utilização de mapas de CEa para auxiliar a determinação de zonas de manejo.

## CONCLUSÕES

Os valores médios da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), obtidos em diferentes datas e para uma mesma área, foram significativamente correlacionados com os valores médios do teor de água do solo. Isso indica a existência de uma relação de dependência entre a CEa e o teor de água do solo.

Uma menor variabilidade no teor de água do solo foi obtida quando seu valor médio apresentou-se mais elevado. Sendo que, os valores médios do teor de água do solo correlacionaram-se negativamente com seus coeficientes de variação.

Uma menor variabilidade do teor de água do solo resultou em uma menor influência desta variável nos valores de CEa. Isso foi observado nesse trabalho, em que a CEa amostrada na data com maior valor médio do teor de água do solo, apresentou uma menor correlação entre os valores pontuais do teor de água e a CEa, sendo este não significativo.

Uma menor influência do teor de água do solo nos valores da CEa proporcionou uma melhor correlação entre a CEa e os atributos do solo. Nesse trabalho, a CEa amostrada com o teor de água mais elevado, correlacionou-se com um maior número de atributos do solo e

apresentou maiores valores do coeficiente de correlação com o pH e com a saturação por bases. Sendo estes atributos de grande importância no manejo das culturas.

A análise da correlação entre a CEa e o teor de água do solo, representa um bom critério para avaliar se CEa amostrada representa a variabilidade de atributos do solo, ou representa principalmente a variabilidade do teor de água. Para as condições desse estudo, a CEa foi mais correlacionada com atributos do solo, quando sua correlação com o teor de água foi menor.

### **AGRADECIMENTOS**

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio concedido ao Programa PROCAD UFV-UEG que possibilitou a realização desse trabalho. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro à realização da pesquisa.

## LITERATURA CITADA

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 4. ed. Viçosa, UFV, 1987. 488 p.

BREVIK, E. C.; FENTON, T. E.; LAZARI, A. Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping. **Precision Agriculture**, v. 7, n. 6, p. 393-404, 2006.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 455-471, 2003.

EKWUE, E. I.; BARTHOLOMEW, J. Electrical conductivity of some soils in Trinidad as affected by density, water and peat content. **Biosystems Engineering**, v. 108, n. 2, p. 95-103, 2010.

GOIÁS. Secretaria de planejamento e desenvolvimento. Bacias Hidrográficas. Superintendência de Estatística, Pesquisa e Informação. Goiânia: SEPLAN/. Disponível em:<<http://www.seplan.go.gov.br/sepin/pub/anoario/2003/SITUACAOFISICA/tabela11.htm>>. Acessado em 15 Out 2010.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm.

LÜCK, E.; GEBBERS, R.; RUEHLMANN, J.; SPANGENBERG, U. Electrical conductivity mapping for precision farming. **Near Surface Geophysics**, v. 7, n. 1, p. 15-25, 2009.

MORAL, F. J.; TERRON, J. M.; SILVA, J. R. M. D. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil and Tillage Research**, P.O. Box 211, Amsterdam, 1000 AE, Netherlands, v. 106, n. 2, p. 335-343, 2010.

GUASTAFERRO, F.; CASTRIGNANÒ, A.; DE BENEDETTO, D.; SOLLITTO, D.; TROCCOLI, A.; CAFARELLI, B. A comparison of different algorithms for the delineation of management zones. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 6, p. 600-620, 2010.

RHOADES, J. D.; MANTEGHI, N. A.; SHOUSE, P. J.; ALVES, W. J. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 2, p. 433-439, 1989.

SHANER, D. L.; KHOSLA, R.; BRODAHL, M. K.; BUCHLEITER, G. W.; FARAHANI, H. J. How well does zone sampling based on soil electrical conductivity maps represent soil variability? **Agronomy Journal**, 677 South Segoe Road, Madison, WI 53711-1086, United States, v. 100, n. 5, p. 1472-1480, 2008.

## CAPÍTULO 2

### DELIMITAÇÃO DE CLASSES DE MANEJO A PARTIR DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO

#### RESUMO

A amostragem indireta de atributos do solo por meio da condutividade elétrica aparente (CEa) tem sido frequentemente utilizado em agricultura de precisão. A CEa correlaciona-se com vários atributos do solo, sendo uma boa informação para definir zonas de manejo. Entretanto, uma vez definidas classes onde a CEa é mais homogênea, deve-se avaliar se o atributo do solo a ser manejado apresenta médias diferentes em todas as classes. O objetivo deste trabalho foi propor um método iterativo que avalia os atributos do solo no interior das classes de CEa e que faça a junção de classes cujas médias do atributo analisado seja iguais, para que ao final do processo todas as classes restantes sejam distintas. As classes de CEa foram delimitadas pelo classificador Fuzzy c-means e o número de classes estabelecido pela análise do Índice de Performance Fuzzy (FPI) e da Entropia de Partição Modificada (MPE). Os atributos do solo foram caracterizados no interior de cada classe de CEa por cinco amostras e as médias dos atributos nas classes foram comparadas pelo teste t de Student. O método de junção de classes com médias iguais resultou em um padrão de duas classes para os atributos pH, (H+Al), V, Fe e T e para os demais atributos resultou na junção de todas as classes. O padrão com duas classes foi comparado com a classificação fuzzy, aplicada aos mapas interpolados de cada atributo, por meio do coeficiente Kappa. O método apresentou uma concordância muito boa para pH, (H+Al), V e Fe e uma concordância boa para a T do solo, quando comparada com a classificação fuzzy.

**Palavras-chave:** agricultura de precisão, zonas de manejo, teste t de Student

### DELIMITATION OF MANAGEMENT CLASSES FROM APPARENT SOIL ELECTRICAL CONDUCTIVITY

#### ABSTRACT

Sampling indirect of soil attributes through apparent electrical conductivity (ECa) has often been used in precision agriculture. The ECa correlates with several soil properties, being

a good information to define management zones. However, once defined classes where ECa is more homogeneous, one must assess if the attribute of the soil to be managed presents different averages for all classes. The objective of this work was to propose an interactive method that evaluates the soil attributes within classes ECa and that makes the junction of classes whose means of the attribute are equal, that at the end of the process all classes remainder are different for the attribute of interest. The classes of ECa were defined by fuzzy c-means classifier and the number of classes established by the analysis the fuzzy performance index (FPI) and Modified Partition Entropy (MPE). The soil properties were characterized within each class of ECa for five samples and the averages of the attributes in classes were compared by t test Student. The method to unite classes with equal means resulted in a standard two-class attributes for pH (H + Al), V, Fe and T and other attributes resulted in the uniting all classes. The pattern with two classes was compared with fuzzy classification, applied to the interpolated maps of each attribute, using the Kappa coefficient. The method presented a very good agreement for pH (H + Al), V and Fe and a good agreement for T of soil, when compared with the fuzzy classification.

**Key words:** precision agriculture, management zones, student t test

## INTRODUÇÃO

A produção vegetal resulta da interação da cultura com vários fatores, tais como clima, pragas, doenças e fertilidade do solo. Esses fatores determinam uma maior ou menor produtividade dos campos. Atributos do solo associados à fertilidade são mais facilmente manejáveis e quando adequadamente analisados resultam em maiores incrementos na produtividade. Entretanto, processos físicos, químicos e biológicos atuam simultaneamente com diferentes intensidades, proporcionando variabilidade de fertilidade nos campos de produção (MORAL *et al.*, 2010). Segundo Corwin *et al.* (1999), o tratamento dos campos como sendo uniforme não é a estratégia mais eficaz e a agricultura de precisão é considerada a abordagem mais viável para uma agricultura sustentável.

Na agricultura convencional, a recomendação de corretivos e fertilizantes é realizada em função da média dos atributos, obtidos de poucas amostras de solo coletadas de forma aleatória ou semi aleatória no campo (TAYLOR *et al.*, 2007). Essa prática é bastante pertinente e funcional quando se trata de uma área cujas variações são aleatórias e não

obedece a um padrão espacial. Nessas condições torna-se coerente a aplicação de insumos em função da média de algumas amostras coletadas ao acaso. Porém, se a variabilidade do campo obedece a um padrão espacial, este método deixa de ser apropriado, além de poder acarretar redução da produtividade. Isso é possível, pois regiões com níveis elevados de determinados nutrientes receberão ainda mais, podendo atingir níveis de toxicidade. Por outro lado, regiões com baixo nível do nutriente não responderão de forma esperada à operação de manejo. Dessa forma, a condição de equilíbrio nutricional não é alcançada em nenhuma das situações que não estejam próximas à média.

O surgimento de novas tecnologias e o aprimoramento de técnicas de geoestatística possibilitaram o mapeamento dos atributos de interesse nas áreas de cultivo, além de gerar mapas de recomendação de fertilizantes e corretivos para aplicação à taxa variada. Contudo, a qualidade dos mapas gerados depende do número de amostras coletadas e do ajuste do variograma. Webster e Oliver (1992) recomendam um número mínimo de 150 pontos amostrais para a estimativa de variogramas confiáveis. Assim, o custo de aquisição e análise de amostras torna-se um fator limitante da implantação da agricultura de precisão.

Grande importância tem sido dada a amostragem de atributos que indiretamente estão correlacionados a atributos de interesse agrônomo. A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) tem-se destacado como um método bem-sucedido de avaliar com rapidez, alta resolução e baixo custo, a condição geral de fertilidade do solo (SUDDUTH *et al.*, 2005). A CEa é resultado da complexa interação de atributos do solo e geralmente está associada a suas propriedades físico-químicas (MORAL *et al.*, 2010). Devido a sua associação com a produtividade, tem sido utilizada para determinar zonas mais homogêneas no campo para o manejo diferenciado (JOHNSON e RICHARD, 2003; CASTRIGNANÒ *et al.*, 2006; MORARI *et al.*, 2009).

As zonas de manejo representam sub-regiões nas quais os valores de um atributo pertencentes a uma zona são mais semelhantes entre si que aos membros de outras zonas (LARK, 1998). Diferentes zonas de manejo podem ser geradas para diferentes atributos. Várias abordagens têm sido sugeridas para definição de zonas de manejo, mas, segundo Guastafèro *et al.* (2010), nenhuma metodologia é aceita de forma inequívoca. Os mesmos autores afirmam que a teoria dos conjuntos Fuzzy para agrupamento tem possibilitado melhor descrever fenômenos naturais que apresentam variação contínua, como é o caso de atributos do solo.

Odeh *et al.* (1992) dizem que o método de classificação Fuzzy c-means é preferível para o agrupamento de atributos contínuos do solo. Mapas de CEa podem ser gerados a partir de amostragem muito densa, o que permite detectar variabilidades do solo em diferentes resoluções. Devido a sua associação com atributos que definem a fertilidade do solo, o agrupamento da CEa em classes mais homogêneas, pode ser útil ao manejo das culturas. Entretanto, não se sabe *a priori* o número mais apropriado de classes a serem definidas, mas pode-se tomar como referência o Índice de Performance Fuzzy (FPI) e a Entropia de Partição Modificada (MPE). O FPI fornece um indicativo da coesão entre as classes geradas e a MPE fornece a quantidade de desordem nas mesmas. O melhor número de classes será aquele que minimiza os dois índices (ODEH *et al.*, 1992). Entretanto, a CEa do solo é determinada pela interação simultânea de vários atributos. Sendo assim, é possível que atributos do solo não se diferenciem para todas as classes de CEa geradas. Um pequeno número de amostras pode ser coletado no interior das classes sem grandes custos ao agricultor. O valor médio dos atributos pode ser comparado entre as classes por um teste de hipótese. Como se trata de um pequeno número de amostras, o teste t de Student é o método mais apropriado para comparar os contrastes formados pela combinação das classes (TAVARES, 2007). Classes de CEa que apresentarem médias iguais para um atributo do solo, representam uma área que pode ser manejada igualmente para tal atributo.

Um forte indício de que a área de produção é espacialmente heterogênea ocorre quando a CEa apresenta estrutura de dependência espacial, modelável por variogramas. Isso significa que apesar da variância amostral que independe da espacialização, uma parcela da variância dos dados é devido a sua localização. Quanto maior for a dependência espacial de um atributo, mais se justifica a não utilização de recomendações pela média do atributo no campo. O objetivo deste trabalho foi propor um método interativo que avalia os atributos do solo no interior das classes de CEa, e que faça a junção de classes cujas médias do atributo analisado sejam iguais, para que ao final do processo todas as classes restantes sejam distintas.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Descrição da área de estudo**

A área de estudo foi um talhão da fazenda “Andréia ou Sozinha”, localizada no município de Goianápolis, no Estado de Goiás, Centro Oeste do Brasil. A sede da fazenda encontra-se nas coordenadas 16°28’20” Sul e 49°00’32” Oeste. Segundo a classificação de Köppen (1928), o clima da região é do tipo Aw tropical úmido, caracterizado pelo inverno

seco e o verão chuvoso. O município encontra-se a 1060 m de altitude, e a precipitação média anual varia entre 1200 a 1800 mm (GOIÁS, 2010). O solo na região é classificado com Latossolo Vermelho Amarelo. A área de estudo foi cultivada no ano agrícola 2009/2010 com milho e a no ano agrícola 2010/2011 foi cultivado com soja, sendo adotado o sistema de plantio direto.

### **Coleta de amostras de solo e de CEa**

A delimitação da área experimental foi realizada com o auxílio de um GPS topográfico, marca Magellan, modelo Promark 3. Foi realizada a correção diferencial pós-processada utilizando a base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), localizada em Brasília. O Sistema de Informações Geográficas (SIG) utilizado foi o ArcGIS (Versão 9.3, da ESRI Inc., Redlands, CA, EUA). Com auxílio do SIG foi criada uma malha regular de pontos no interior da área de estudo, onde foram coletadas as amostras de CEa e de solo. O GPS foi utilizado para localização dos pontos amostrados em campo. A malha de pontos amostrados apresentou uma densidade de dois pontos por hectare em uma área de 75 hectares, perfazendo um total de 150 pontos.

As amostras de solo foram coletadas com auxílio de um trado de rosca, na camada de 0 a 0,20 m do perfil do solo. Cada amostra foi composta por dez subamostras de solo coletadas de forma aleatória dentro de um raio de cinco metros a partir do ponto. A análise química do solo foi composta de pH, acidez potencial (H + Al), teores de Ca, Mg, K, P, Al, P-rem, matéria orgânica, soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva (t) e CTC total (T), saturação por bases (V), e os teores de Zn, Fe, Mn e Cu. Quanto a análise física foi determinada a textura do solo, quantificando os teores de argila, silte e areia total.

A CEa do solo foi determinada no dia 23 de novembro de 2010 utilizando um aparelho portátil fabricado por Landviser, modelo LandMapper® ERM 02. O aparelho foi comparado com um condutivímetro de bancada, apresentando coeficiente de correlação  $r = 0,98$  (Apêndice B). O LandMapper® ERM 02 utiliza o princípio da resistividade elétrica (RE), que é medida por meio do contato de quatro eletrodos com o solo. A configuração dos eletrodos utilizada foi a *Matriz de Wenner*, ajustada de tal forma que as leituras representem a camada de 0 a 0,20 m de profundidade. Nessa configuração, os eletrodos são dispostos em linha e igualmente espaçados segundo descrito por Corwin e Lesch (2003). No momento da amostragem de CEa o teor de água do solo médio foi de 22 %. Esse valor foi obtido de 30 amostras de teor de água do solo amostradas na área de estudo. Em cada ponto a CEa foi

representado pela média de cinco determinações obtidas no entorno do ponto a uma distância de até cinco m, para os 150 pontos.

### **Análise de correlação entre a CEa e atributos do solo**

Utilizando o software estatístico SAS versão 9.2 (SAS Institute, 2008) realizou-se a análise de correlação de Pearson com teste de significância para hipótese da nulidade ( $H_0, r = 0$ ), entre a CEa e atributos físico-químicos do solo. Esse procedimento foi realizado com o intuito de avaliar o relacionamento entre a CEa e os atributos que determinam a fertilidade do solo. Foram utilizadas as 150 amostras coletadas no campo em estudo.

### **Análise geoestatística e interpolação dos dados**

A distribuição espacial dos atributos físico-químicos do solo, bem como a CEa foi caracterizada utilizando técnicas de geoestatísticas presente no pacote do programa GS+ versão 7.0 (ROBERTSON, 1998). Os semivariogramas foram calculados considerando um comportamento isotrópico da dependência espacial, para todos os atributos estudados. Os modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas experimentais visaram maximizar o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e reduzir a soma de quadrados do resíduo (SQR). Os mapas interpolados foram confeccionados utilizando o método de krigagem ordinária. Cada pixel dos mapas gerados representou uma área de 5 m x 5 m.

### **Análise de agrupamento**

Para realizar a análise de agrupamento foi utilizado o programa de computador FuzME versão 3.5 desenvolvido por Minasny e McBratney (2002). O Índice de Performance Fuzzy (FPI) e a Entropia de Partição Modificada (MPE) foram utilizados para definir o número mais apropriados de classes (ODEH *et al.*, 1992; FRIDGEN *et al.*, 2004; SUN *et al.*, 2011). Foi realizada a classificação com número de classes variando de 2 a 5. Para cada classificação foram determinados os índices FPI e MPE. O número mais apropriado de classes, segundo Odeh *et al.* (1992), apresenta um menor FPI e uma maior organização nos grupos, que é expressa por uma menor MPE, obtida no processo de agrupamento.

## Diferenciação de classes de CEa para atributos de interesse

A CEa no campo é determinada pela interação de vários atributos simultaneamente. Sendo assim, atributos correlacionados com a CEa podem não se diferenciar para todas as classes definidas pelo método de classificação. A média das amostras no interior das classes pode ser comparada por um teste de hipótese. Nesse trabalho foi utilizado o teste t para comparar a média dos atributos do solo entre as classes de CEa. Essa análise foi realizada comparando a média obtida de cinco amostras coletadas no interior de cada classe de CEa. As amostras foram selecionadas a partir da grade definida com os 150 pontos. Amostras muito próximas das regiões de transição foram desconsideradas e foram selecionadas aleatoriamente amostras que representassem o interior das classes, segundo sugerido por Taylor *et al.* (2007).

Para cada atributo, o teste t foi realizado para os contrastes possíveis, gerados a partir das classes de CEa, considerando amostras independentes com variâncias desconhecidas, porém homogêneas. Assim a probabilidade de rejeitar  $H_0$  pelo teste t, pode ser obtida para o nível de significância  $\alpha$ , com  $(n_x + n_y - 2)$  graus de liberdade, em que  $n_x$  e  $n_y$  representam o número de amostras em cada classe (Equações 1 e 2).

(1)

$$t_{cal} = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{S_C^2 \left( \frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y} \right)}}$$

$$S_C^2 = \frac{(n_x - 1)S_x^2 + (n_y - 1)S_y^2}{n_x + n_y - 2} \quad (2)$$

Em que:

$t_{cal}$  = Estatística t calculada;

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  = Médias amostrais das classes comparadas;

$n_x$  e  $n_y$  = Número de amostras em cada classe;

$S_x^2$  e  $S_y^2$  = Estimativa das variâncias amostrais;

$S_C^2$  = Variância combinada.

O nível de significância estabelecido para rejeitar  $H_0$  foi de 0,05. Assim, classes cujas médias não se diferem devem ser unidas e igualmente manejadas. Esse trabalho sugere um processo iterativo de união de classes iguais, de modo que ao fim da operação todas as

classes restantes se diferenciem estatisticamente, ao nível de probabilidade adotado. Nesse método, o teste t é aplicado para testar os contrastes possíveis gerados a partir das classes de CEa, para o atributo que se deseja avaliar. Se  $H_0$  for rejeitada para o contraste com maior probabilidade de aceitar  $H_0$ , consequentemente será rejeitado para os demais contrastes. Caso contrário, as classes do contraste são unidas e a operação é repetida até que todas as classes restantes sejam distintas ou reste somente uma classe (Figura 1).

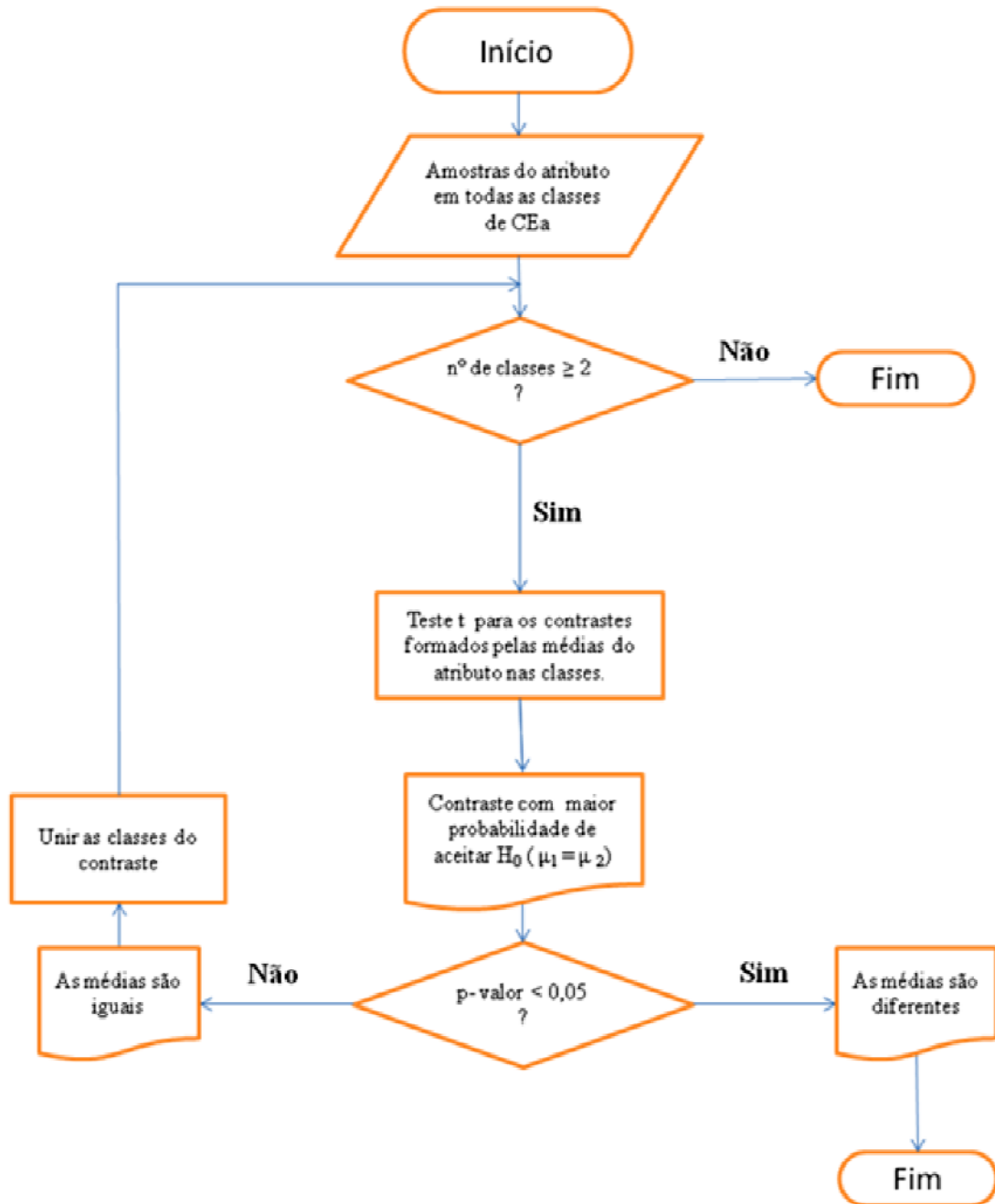


Figura 1: Esquema do processo iterativo de união de classes iguais.

Para avaliar a classificação dos atributos do solo após a união das classes iguais, o mapa resultante da análise foi comparado como a classificação pelo método Fuzzy c-mean que utilizou os mapas interpolados de cada atributo. O número de classe adotado na classificação fuzzy foi o mesmo obtido pelo método de junção de classes iguais. A concordância entre os mapas foi avaliada pelo coeficiente Kappa de Cohen descrito na Equação 3, conforme sugerido por Hudson e Ramm (1987) a partir de uma matriz de erros.

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i\oplus} x_{\oplus i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i\oplus} x_{\oplus i}} \quad (3)$$

Em que:

$\hat{K}$  = Coeficiente Kappa

$x_{ii}$  = valor na linha i e coluna i da matriz de erros;

$x_{i\oplus}$  = total da linha i;

$x_{\oplus i}$  = total da coluna i;

n = número total da amostra;

c = número total de classes.

O coeficiente Kappa foi avaliado segundo a classificação estabelecida por Landis e Koch (1977), citada por Rodrigues *et al.* (2007). Os autores classificam o coeficiente como: “Péssimo”, k menor ou igual a 0; “Ruim”, k maior que 0 e menor ou igual a 0,20; “Razoável”, k maior que 0,20 e menor ou igual a 0,40; “Bom”, k maior que 0,40 e menor ou igual a 0,60; “Muito bom”, k maior que 0,60 e menor ou igual a 0,80 e “Excelente” com k maior que 0,80 e menor ou igual a 1.

## RESULTADOS

Durante a amostragem da CEa, amostras de solo para determinação do teor de água foram coletadas em 30 pontos distribuídos na área de estudo. O valor médio do teor de água do solo foi de 22 % e apresentou um coeficiente de variação de 9,6 %. Essas amostras foram utilizadas para avaliar a correlação entre a CEa e o teor de água do solo. O coeficiente de correlação para essa análise foi  $r = 0,10$  e a probabilidade desse valor ser igual a zero foi p-

valor = 0,671. Esse resultado mostra que a variabilidade da CEa, coletada nesta condição, não foi influenciada significativamente pelo teor de água do solo. A análise de correlação de Pearson entre a CEa e atributos químicos e físicos do solo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Análise de correlação de Pearson entre a CEa do solo e atributos físicos e químicos.

| Atributos do solo | CEa   |          |
|-------------------|-------|----------|
|                   | r     | p- valor |
| pH                | 0,53  | <0,001   |
| V                 | 0,52  | <0,001   |
| t                 | 0,47  | <0,001   |
| SB                | 0,47  | <0,001   |
| H+Al              | -0,45 | <0,001   |
| Ca                | 0,44  | <0,001   |
| Mg                | 0,43  | <0,001   |
| Fe                | -0,39 | <0,001   |
| P_rem             | -0,32 | <0,001   |
| Areia             | -0,30 | <0,001   |
| CEes              | 0,29  | 0,001    |
| Silte             | 0,27  | 0,001    |
| Zn                | 0,23  | 0,006    |
| T                 | -0,19 | 0,024    |
| Altitude          | -0,18 | 0,032    |
| S                 | -0,17 | 0,043    |
| Argila            | 0,17  | 0,046    |
| Mn                | 0,17  | 0,048    |
| B                 | 0,11  | 0,178    |
| K                 | -0,08 | 0,318    |
| P                 | -0,06 | 0,506    |
| Cu                | 0,05  | 0,537    |
| MO                | 0,04  | 0,627    |

r – coeficiente de correlação; p-valor – probabilidade de aceitar  $H_0$  ( $r = 0$ ); ns – Não significativo a 5% de probabilidade; pH - potencial hidrogeniônico (1:2,5); V – Saturação por bases; t – Capacidade de troca catiônica efetiva; SB – Soma de bases; H + Al – Acides potencial; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; Fe – Ferro; P-rem – Fósforo remanescente; CEes – Condutividade elétrica do extrato de saturação (1:5); Zn – Zinco; T – Capacidade de troca catiônica potencial; S – Enxofre; Mn – Manganês; B – boro; K – potássio; P – fósforo; Cu – Cobre; MO – Matéria orgânica.

A CEa correlacionou-se significativamente com a maioria dos atributos do solo analisados. Dessa forma, pode se considerada um bom indicador para definir zonas de manejo. Foi analisada a estrutura de dependência espacial para a CEa e para os atributos do solo a ela correlacionados. O primeiro item da Tabela 2 é a CEa e os demais itens estão ordenados em ordem crescente, em função do índice de dependência espacial.

Tabela 2: Análise da dependência espacial e validação cruzada dos mapas interpolados dos atributos do solo e CEa.

| Variável | Ajuste de semivariogramas |                |       |        |         |       | Validação cruzada da krigagem |                |
|----------|---------------------------|----------------|-------|--------|---------|-------|-------------------------------|----------------|
|          | Modelo                    | R <sup>2</sup> | Co    | (Co+C) | IDE (%) | A (m) | Coef. Angular                 | R <sup>2</sup> |
| CEa      | Esférico                  | 0,963          | 0,761 | 1,525  | 50,1    | 908   | 1,017                         | 0,283          |
| Altitude | Gaussiano                 | 0,968          | 2,400 | 215,7  | 98,9    | 1645  | 1,039                         | 0,984          |
| Mn       | Esférico                  | 0,922          | 4,400 | 92,30  | 95,2    | 321   | 0,974                         | 0,564          |
| P_rem    | Esférico                  | 0,986          | 0,650 | 12,32  | 94,7    | 275   | 0,981                         | 0,608          |
| T        | Esférico                  | 0,957          | 0,060 | 0,851  | 92,9    | 557   | 1,012                         | 0,640          |
| H+Al     | Gaussiano                 | 0,964          | 0,188 | 1,058  | 82,2    | 592   | 1,03                          | 0,661          |
| pH       | Gaussiano                 | 0,992          | 0,027 | 0,119  | 76,8    | 663   | 1,036                         | 0,619          |
| V        | Gaussiano                 | 0,978          | 42,40 | 157,80 | 73,1    | 639   | 1,02                          | 0,546          |
| Fe       | Esférico                  | 0,994          | 8,580 | 30,09  | 71,5    | 455   | 1,001                         | 0,470          |
| Areia    | Esférico                  | 0,987          | 7,960 | 21,48  | 62,9    | 374   | 0,942                         | 0,319          |
| Argila   | Esférico                  | 0,982          | 4,610 | 12,05  | 61,7    | 285   | 0,89                          | 0,266          |
| Ca       | Esférico                  | 0,968          | 0,086 | 0,213  | 59,4    | 447   | 0,927                         | 0,292          |
| SB       | Esférico                  | 0,942          | 0,128 | 0,288  | 55,5    | 410   | 0,913                         | 0,266          |
| t        | Esférico                  | 0,942          | 0,128 | 0,288  | 55,5    | 410   | 0,913                         | 0,266          |
| Mg       | Esférico                  | 0,943          | 0,007 | 0,015  | 51,3    | 350   | 0,895                         | 0,246          |
| Silte    | Esférico                  | 0,723          | 4,750 | 9,510  | 50,1    | 440   | 0,927                         | 0,178          |
| S        | Esférico                  | 0,96           | 2,949 | 5,899  | 50      | 230   | 0,784                         | 0,127          |
| CEes     | Esférico                  | 0,966          | 62,00 | 124,10 | 50      | 301   | 0,894                         | 0,242          |
| Zn       | Linear                    | 0,402          | 2,649 | 3,196  | 17      | 744   | 0,002                         | 0,005          |

Co – Efeito pepita; (Co+C) – Patamar; IDE - Índice de dependência espacial de Zinback, (2001)  $C/(Co+C)*100$ ; A (m) - Alcance da dependência espacial em metros. R<sup>2</sup> Coeficiente de determinação. pH - potencial hidrogeniônico (1:2,5); V – Saturação por bases; t – Capacidade de troca catiônica efetiva; SB – Soma de bases; H + Al – Acides potencial; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; Fe – Ferro; P-rem – Fósforo remanescente; CEes – Condutividade elétrica do extrato de saturação (1:5); Zn – Zinco; T – Capacidade de troca catiônica potencial; S – Enxofre; Mn – Manganês; B – boro; K – potássio; P – fósforo; Cu – Cobre; MO – Matéria orgânica.

Pode-se observar na Tabela 2 que os atributos que apresentaram uma maior dependência espacial obtiveram melhores resultados para os parâmetros da validação cruzada, caracterizada pelo coeficiente da regressão e do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>). Na Figura 2 é apresentado o mapa de CEa do solo, interpolado pelo método de Krigagem Ordinária.

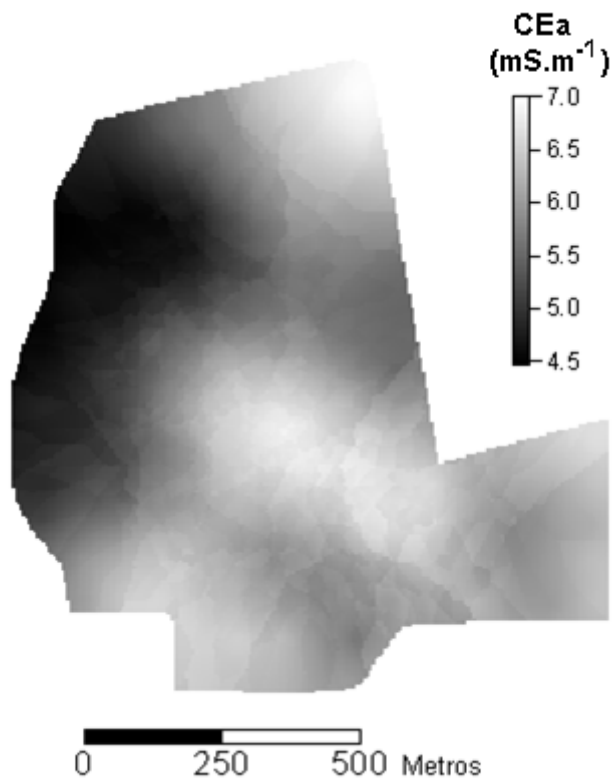


Figura 2: Mapa interpolado da condutividade elétrica aparente do solo.

O mapa interpolado de CEa foi submetido ao classificador Fuzzy c-means e a classificação foi avaliada com número de classes variando de 2 a 5. Para cada classificação, o Índice de Desempenho Fuzzy (FPI) e a Entropia de Partição Modificada (MPE) foram calculados e são apresentados na figura 3.

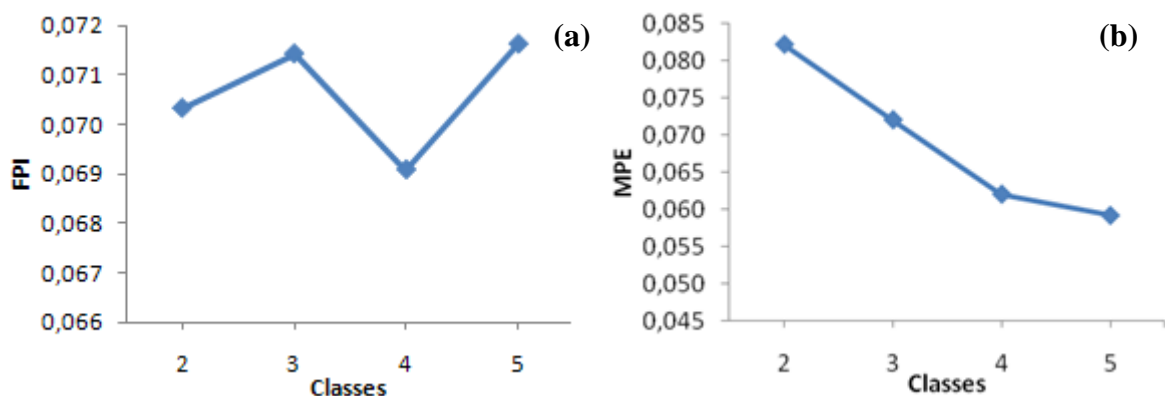


Figura 3: Índice de Performance Fuzzy (a); Entropia de Partição Modificada (b).

O ponto de equilíbrio, em que os dois índices são relativamente menores, sugere quatro classes como sendo o número de partições mais apropriado. O mapa de CEa do solo foi

classificado pelo método fuzzy, gerando 4 regiões em que seus valores apresentam-se mais homogêneos (Figura 4).

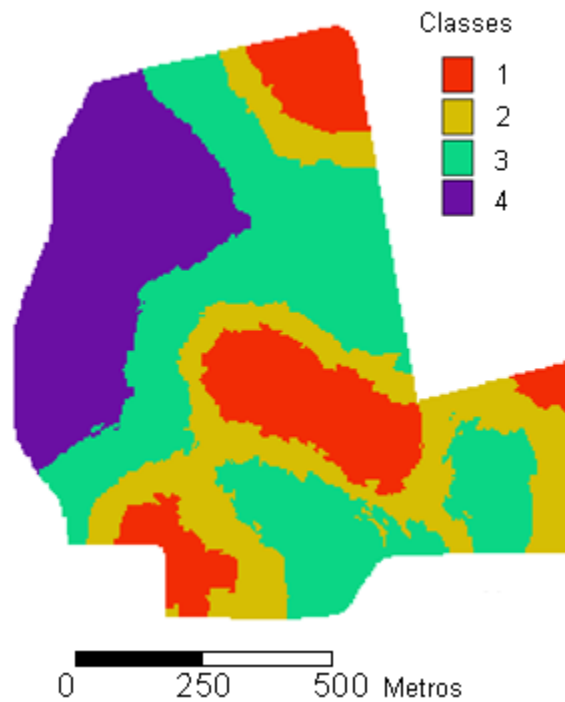


Figura 4: Classes de CEA do solo geradas pelo classificador Fuzzy c-means.

Na Tabela 3 são apresentados as médias dos atributos do solo correlacionados a CEA seguidos do intervalo de confiança. O número de amostras em cada classe foi: classe 1, 27; classe 2, 33; classe 3, 54 e classe 6, 36 amostras. Para todos os atributos, pode ser observado que existem classes cujas médias são muito semelhantes considerando o intervalo de confiança para uma distribuição normal de 95 %.

Tabela 3: Média e intervalo de confiança da média para os atributos do solo correlacionados a CEa, considerando todos os pontos amostrados nas classes.

|        | Classe 1 |        | Classe 2 |        | Classe 3 |        | Classe 4 |        |
|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
|        | Média    | IC     | Média    | IC     | Média    | IC     | Média    | IC     |
| pH     | 6,94     | ± 0,04 | 6,82     | ± 0,08 | 6,80     | ± 0,06 | 6,38     | ± 0,10 |
| V      | 77,92    | ± 2,32 | 74,91    | ± 2,88 | 74,79    | ± 2,67 | 59,74    | ± 3,83 |
| t      | 4,62     | ± 0,17 | 4,24     | ± 0,15 | 4,17     | ± 0,12 | 3,83     | ± 0,22 |
| SB     | 4,62     | ± 0,17 | 4,24     | ± 0,15 | 4,17     | ± 0,12 | 3,83     | ± 0,22 |
| H+Al   | 1,33     | ± 0,17 | 1,46     | ± 0,20 | 1,46     | ± 0,18 | 2,70     | ± 0,42 |
| Ca     | 3,56     | ± 0,15 | 3,28     | ± 0,13 | 3,24     | ± 0,10 | 2,92     | ± 0,18 |
| Mg     | 0,93     | ± 0,04 | 0,83     | ± 0,04 | 0,81     | ± 0,03 | 0,76     | ± 0,05 |
| Fe     | 18,02    | ± 1,21 | 20,31    | ± 1,65 | 21,94    | ± 1,46 | 27,11    | ± 1,80 |
| P_rem  | 15,19    | ± 0,92 | 16,93    | ± 1,07 | 17,64    | ± 0,92 | 19,58    | ± 1,22 |
| Areia  | 54,38    | ± 1,56 | 55,09    | ± 1,68 | 57,25    | ± 1,11 | 57,94    | ± 1,56 |
| CEes   | 74,87    | ± 4,60 | 77,55    | ± 4,45 | 71,76    | ± 2,71 | 66,19    | ± 3,86 |
| Silte  | 12,04    | ± 1,35 | 11,33    | ± 1,07 | 9,94     | ± 0,74 | 9,94     | ± 0,96 |
| Zn     | 4,20     | ± 0,59 | 3,88     | ± 0,62 | 3,88     | ± 0,78 | 2,94     | ± 0,66 |
| T      | 5,95     | ± 0,22 | 5,70     | ± 0,22 | 5,63     | ± 0,17 | 6,53     | ± 0,45 |
| S      | 11,50    | ± 1,39 | 10,74    | ± 0,88 | 11,20    | ± 0,51 | 12,27    | ± 0,69 |
| Argila | 33,58    | ± 1,24 | 33,58    | ± 1,38 | 32,79    | ± 0,85 | 32,13    | ± 1,10 |
| Mn     | 32,90    | ± 4,57 | 25,29    | ± 2,93 | 25,08    | ± 1,42 | 26,65    | ± 4,06 |

IC – intervalo de confiança; pH - potencial hidrogeniônico (1:2,5); V – Saturação por bases; t – Capacidade de troca catiônica efetiva; SB – Soma de bases; H + Al – Acides potencial; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; Fe – Ferro; P-rem – Fósforo remanescente; CEes – Condutividade elétrica do extrato de saturação (1:5); Zn – Zinco; T – Capacidade de troca catiônica potencial; S – Enxofre; Mn – Manganês; B – boro; K – potássio; P – fósforo; Cu – Cobre; MO – Matéria orgânica.

O método proposto nesse trabalho, para analisar e unir classes com médias iguais, reorganizou o mapa de classes de CEa em um padrão com duas classes para os atributos pH, V, (H+Al), Fe, T (Figura 5). Para os demais atributos, todas as classes foram unidas, o que significa que suas médias não se distinguiram entre as classes de CEa.



Figura 5: Padrão de zonas de manejo obtido pelo método de análise das classes de CEa, para os atributos pH, V, (H+Al), Fe, T.

O padrão (a) da Figura 5 foi comparado com a classificação realizada com Fuzzy c-means a partir dos mapas interpolados para os atributos. A comparação foi realizada pelo coeficiente Kappa de Cohen apresentado na Tabela 4. A classificação obtida pelo método Fuzzy c-means, para os atributos que geraram o padrão de duas classes são apresentados na Figura 6.

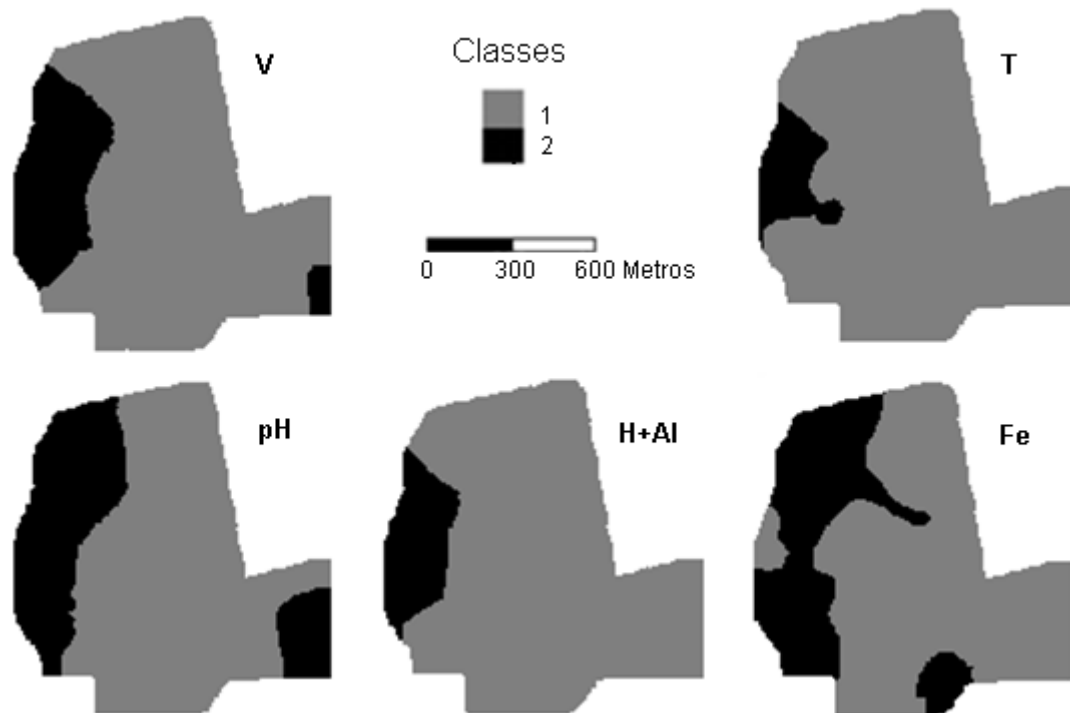


Figura 6: Classificação Fuzzy c-means para os atributos V, pH, (H+Al), Fe, e T.

Tabela 4: Coeficiente Kappa de Cohen para classificação de atributos por meio de classes de CEa, considerando a classificação Fuzzy como referência.

| Variáveis | Kappa | Interpretação do Coef. Kappa* |
|-----------|-------|-------------------------------|
| pH        | 0,75  | Muito bom                     |
| H+Al      | 0,65  | Muito bom                     |
| T         | 0,48  | Bom                           |
| V         | 0,70  | Muito bom                     |
| Fe        | 0,62  | Muito bom                     |

\*Classificação segundo Landis e Koch (1977)

Os coeficientes Kappa apresentados na Tabela 4 mostram bons resultados para as classificações. Assim, zonas de manejo geradas a partir da CEa do solo e o método proposto, apresentaram uma boa concordância com as zonas de manejo geradas a partir dos mapas interpolados dos atributos, utilizando o classificador Fuzzy c-means. Na Tabela 5 são apresentados as médias e desvio padrão para os atributos amostrados nas duas zonas de manejo geradas a partir da CEa.

Tabela 5: Média e desvio padrão para os atributos que se diferenciaram nas zonas de manejo 1 e 2.

|      | Unidades                | Zona de manejo 1 |                | Zona de manejo 2 |               |
|------|-------------------------|------------------|----------------|------------------|---------------|
|      |                         | Média            | Desvio Padrão* | Média            | Desvio Padrão |
| pH   |                         | 6,85             | 0,24           | 6,28             | 0,18          |
| V    | %                       | 77,07            | 8,08           | 57,00            | 9,62          |
| H+Al | cmolc. dm <sup>-3</sup> | 1,30             | 0,57           | 3,17             | 1,57          |
| T    | cmolc. dm <sup>-3</sup> | 5,56             | 0,79           | 7,06             | 1,93          |
| Fe   | mg. dm <sup>-3</sup>    | 19,31            | 2,97           | 28,44            | 8,07          |

pH – potencial hidrogeniônico; V – saturação por bases; H + Al – acidez potencial; T – capacidade de troca catiônica; Fe – ferro.

## DISCUSSÃO

Ao delimitar zonas de manejo em um campo de produção agrícola, geralmente utilizam-se atributos chaves, tais como textura, altitude, CEa ou mesmo a combinação de vários atributos, normalmente associados a variabilidade de atributos manejáveis. O campo pode ser facilmente estratificado utilizando mapas interpolados e algum método de agrupamento, como Fuzzy c-means por exemplo. Entretanto, quando se classifica um atributo chave e deseja-se assumir suas classes como classes de manejo para atributos manejáveis, deve-se investigar o comportamento dos mesmos no interior de cada classe. Essa investigação

deve ser feita por meio de amostras diretas de solo ou planta, necessárias para calcular as doses necessárias de corretivos, fertilizantes ou defensivos agrícolas.

A análise de correlação apresentada na Tabela 1, revela a existência de correlação entre a CEa e vários atributos do solo, o que indica que parte da variabilidade desses atributos são explicadas pela variabilidade da CEa, que pode ser considerada uma variável chave para estratificação do campo. Utilizando somente o método de classificação Fuzzy c-means, a área de estudo foi estratificada em quatro classes de CEa do solo. Ainda que o agricultor assuma essas classes como classes de manejo, para definir a estratégia de manejo terá que amostrar todas as classes para os atributos manejáveis. Contudo é possível que os valores de alguns atributos sejam muito semelhantes entre as classes e o produtor deve decidir em maneja-las igualmente ou não. O mais coerente seria tomar essa decisão com bases em um limite de probabilidade, como proposto no método apresentados nesse trabalho. A partir de cinco amostras de solo coletadas em cada classe, as classes de CEa foram reorganizadas em duas classes de manejo, com médias distintas a 5 % de significância estatística para os atributos pH, V, (H+Al), Fe e T.

Os atributos que não gerarão classes de manejo, apresentaram médias estatisticamente iguais entre os contrastes formados pelas classes de CEa, o que resultou na junção de todas as classes. A maioria desses atributos tem como características comum, uma menor correlação com a CEa (Tabela 1) e uma menor dependência espacial expressa pelo índice de dependência espacial (IDE) proposto por Zimback, (2001) (Tabela 2). O IDE representa a fração da semivariância que caracteriza a dependência espacial. Quando o IDE tende a zero, a variabilidade do atributo avaliado no campo tende a não depender de sua localização. Dessa forma, espera-se que as médias do atributo sejam iguais em todas as classes, pois o que diferencia as classes umas das outras é somente suas localização. Deve-se também observar a possível influencia do alcance da dependência espacial dos atributos. Na Tabela 2, os atributos que geraram duas classes de manejo apresentaram alcance entre 455 e 663 metros. Os atributos que apresentaram alcance inferior a 455 m ou superior a 663 m foram os que resultaram na junção de todas as classes. Possivelmente, exista uma relação entre o alcance da dependência espacial e as dimensões das classes que favoreça esse resultado. Esse fator, combinado com uma menor correlação com a CEa pode está associado ao fato dos atributos altitude, P-rem e Mn não se diferenciarem entre as classes de CEa, embora tenham apresentado elevados IDE.

O método de classificação Fuzzy c-means foi utilizado para gerar as classes iniciais de CEa do solo. Dessa forma, o método proposto nesse estudo representa um complemento da classificação Fuzzy quando o objetivo é gerar classes de manejo para atributos solo a partir de atributos chave na identificação da variabilidade do campo. Entretanto, quando os mapas interpolados dos atributos são disponíveis, são comumente classificados pelo método Fuzzy. O problema de se gerar classes de manejo por meio dos mapas interpolados dos atributos é devido ao número de amostras de solo necessárias para gerar esses mapas, que proporciona um custo elevado. O método para unir classes de CEa com médias iguais para os atributos do solo, foi comparado com o método de classificação Fuzzy c-means utilizados nos mapas interpolados dos atributos (Tabela 5). O método proposto apresentou uma concordância “muito boa” com a classificação Fuzzy c-means a partir de mapas interpolados para os atributos pH, (H+Al), Fe e V respectivamente e uma concordância “boa” para a T do solo, segundo critério estabelecido por Landis e Koch (1977) para interpretação do coeficiente Kappa. Esse método pode ser considerado de baixo custo, pois necessitou apenas do mapa interpolado de CEa, que apresenta baixo custo de aquisição, e um total de 20 amostras de solo, para as condições desse estudo. Já para a classificação fuzzy utilizando os mapas interpolados foram utilizadas 150 amostras de solo.

Segundo o proprietário da fazenda, foi aplicado calcário para elevar a saturação por bases média (V) ao nível de 70 % da capacidade de troca catiônica média (T) do solo. Contudo, a T apresentou médias diferentes para as duas zonas de manejo, o que resultou em uma V superior ao nível desejado para zona de manejo 1 e inferior ao nível desejado para a zona de manejo 2. Dessa forma, em uma região a dose do corretivo foi subestimada e na outra foi superestimada, não sendo obtido o nível de manejo desejado em nenhuma das regiões. Entretanto, o produtor pode considerar um bom resultado quando avalia a V obtida a partir da média dos 150 pontos amostrados que foi de 72 %, o que representa um equívoco. A diferença da V nas duas zonas resultou em diferentes níveis de pH do solo, sendo que na região que apresentou uma maior V, o pH do solo foi mais elevado. A diferença de pH nas duas zonas reflete uma acidez potencial (H+Al) diferenciada para as mesmas. O pH do solo também define a disponibilidade de alguns nutrientes como é o caso do Fe que teve uma maior disponibilidade na zona em que o pH do solo foi menor.

Para as condições desse estudo a CEa representou um bom atributo chave para identificar a variabilidade do campo. Outros atributos chave, tais como altitude, textura e produtividade podem ser avaliados juntamente com a CEa ou de forma independente, para

delimitar as classes iniciais onde os atributos de interesse devem ser investigados pelo método proposto. O resultado do método deve ser melhor, quanto melhor for o atributo chave em representar a variabilidade espacial do campo de produção agrícola.

## **CONCLUSÕES**

Nesse estudo de caso, a CEa foi considerada um bom atributo para determinar classes de manejo, pois, correlacionou-se com vários atributos do solo de importância agronômica. As classes em que a CEa apresentou-se mais homogênea foram caracterizadas por um pequeno número de amostras, sendo verificada a existência de classes cujas médias dos atributos não diferiram.

A análise do atributo chave CEa, utilizando a classificação fuzzy c-means complementada pelo método proposto, apresentou um bom resultado comparado com a classificação utilizando somente da classificação fuzzy. As classes de manejo geradas para os atributos pH, V, (H+Al), Fe e T apresentaram um elevado coeficiente Kappa, quando comparados com as classes geradas somente pelo classificador fuzzy, a partir dos mapas interpolados de cada atributo. Assim, a análise de atributos chave utilizando a classificação fuzzy complementada pelo método proposto, pode gerar classes de manejo de elevada concordância com a classificação que utiliza apenas mapas interpolados e o método fuzzy c-means de classificação.

## **AGRADECIMENTOS**

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio concedido ao Programa PROCAD UFV-UEG que possibilitou a realização desse trabalho. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro à realização da pesquisa.

## LITERATURA CITADA

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

CASTRIGNANÒ, A., MORARI, F., MORELLI, G. Assessment of Spatial Relationship Between Some Soil Properties and Electromagnetic Induction Scans. In [CD-ROM] **Proceeding: XVI CGR world congress**, Agricultural engineering for a better world., Bonn (pp. 1-6). Dusseldorf, Germany: VDI Verlag GmbH, 2006.

CORWIN D.L.; LOAGUE K.; ELLSWORTH T.R.; Assessing non-point source pollution in the vadose zone with advanced information technologies. In: D.L. Corwin, K. Loague and T.R. Ellsworth, Editors, Assessment of Non-point Source Pollution in the Vadose Zone. **Geophysical Monogr.** 108, AGU, Washington, DC, USA, 1999, pp. 1–20.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 455-471, 2003.

FRIDGEN, J. J.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T.; WIEBOLD, W. J.; FRAISSE, C. W. Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 1, p. 100-108, 2004.

GOIÁS. Secretaria de planejamento e desenvolvimento. Bacias Hidrográficas. Superintendência de Estatística, Pesquisa e Informação. Goiânia: SEPLAN/. Disponível em:<<http://www.seplan.go.gov.br/sepin/pub/anoario/2003/SITUACAOFISICA/tabela11.htm>> . Acessado em 15 Out 2010

GUASTAFERRO, F.; CASTRIGNANÒ, A.; DE BENEDETTO, D.; SOLLITTO, D.; TROCCOLI, A.; CAFARELLI, B. A comparison of different algorithms for the delineation of management zones. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 6, p. 600-620, 2010.

HUDSON, W.D.; RAMM, C.W. Correct formulation of the Kappa coefficient of agreement. **Photogrammetric Engineering e Remote Sensing**, v.53 n.4 p.421-422, 1987.

JOHNSON, R.M., RICHARD, E.P. Evaluation of crop and soil spatial variability in Louisiana sugarcane production systems. **Precision Agriculture** [CD-ROM]. Proceedings of the 6th International Conference Minneapolis, MN: ASA, CSSA, and Madison, WI: SSSA, 2003.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm.

LANDIS JR, KOCH G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics** 1977; 33: 159-174

LARK, R. M. Forming spatially coherent regions by classification of multi-variate data: an example from the analysis of maps of crop yield. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 12, n. 1, p. 83 - 98, 1998.

MINASNY, B., MCBRATNEY, A.B., 2002. FuzME version 3.0, Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, Australia. (<http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>).

MORAL, F. J.; TERRON, J. M.; SILVA, J. R. M. D. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil and Tillage Research**, P.O. Box 211, Amsterdam, 1000 AE, Netherlands, v. 106, n. 2, p. 335-343, 2010.

MORARI, F.; CASTRIGNANÒ, A.; PAGLIARIN, C. Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geo-electrical sensors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 68, n. 1, p. 97-107, 2009.

ODEH, I. O. A.; MCBRATNEY, A. B.; CHITTLEBOROUGH, D. J. Soil pattern recognition with fuzzy-c-means: application to classification and soil-landform interrelationships. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 2, p. 505-516, 1992

ROBERTSON, G.P.; GS+ Geostatistics for Environmental Science User Manual. Gamma Design Software. Version 3.1. Plainwell, MI, 1998.

RODRIGUES, T. R. I.; ROCHA, A. M.; FILHO, A. P.; Mapeamento de uso e ocupação das terras na Bacia do Baixo Curso do Rio São José do Dourados-SP por sistemas de informações geográficas e imagem de satélite; Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Anais**, XIII, Florianópolis, INPE, 2007, p. 6091-6097.

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**, v. 46, n. 1-3 SPEC. ISS., p. 263-283, 2005

SUN, X.-L.; ZHAO, Y.-G.; WANG, H.-L.; YANG, L.; QIN, C.-Z.; ZHU, A. X.; ZHANG, G.-L.; PEI, T.; LI, B.-L. Sensitivity of digital soil maps based on FCM to the fuzzy exponent and the number of clusters. **Geoderma**, 2011, doi:10.1016/j.geoderma.2011.03.016.

TAVARES, M.; **Estatística Aplicada à Administração**; Sistema Universidade Aberta do Brasil. 2007, 142 p.

TAYLOR, J. A.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M.; Establishing management classes for broadacre agricultural production. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 5, p. 1366-1376, 2007.

WEBSTER, R., OLIVER, M. A.; Sample adequately to estimate variograms of soil properties. **The Journal of Soil Science**, v. 43, p. 177–192, 1992.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 f. (Livre-Docência em Levantamento do Solo e Fotopedologia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

### **CAPÍTULO 3**

## **IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES DETERMINANTES DA VARIABILIDADE TEMPORAL DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO**

### **RESUMO**

A condutividade elétrica aparente do solo (CEa), representa um importante atributo para avaliar a variabilidade espacial dos campos, estando associada a propriedades que determinam as cargas disponíveis no solo. Esse trabalho teve como objetivo, avaliar a variabilidade temporal da CEa utilizando análise de componentes principais (PCA). Em uma mesma área, amostrou-se a CEa em três datas, que representaram as variáveis de entrada para PCA. Foram analisadas as correlações entre as componentes principais (PC) e atributos do solo e a altitude elipsoidal medida com um GPS topográfico. Para identificar a componente que expressa a variabilidade temporal da CEa, analisou-se as correlações entre as PC e as diferenças entre os valores de CEa das três datas. A segunda componente foi a que melhor representou a variabilidade temporal da CEa e explicou 18% da variância total. Essa componente apresentou correlação significativa de -0,39 com a altitude elipsoidal, -0,25 com a capacidade de troca catiônica (T) e 0,22 com a condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes). Foi observada dependência espacial para segunda CP, sendo geradas três classes utilizando Fuzzy c-means a partir do mapa interpolado. As três classes apresentaram valores médios distintos para altitude elipsoidal, quando avaliados seus intervalos de confiança. A T foi maior para as duas classes com altitude média maior e a CEes foi maior para a classe com menor altitude média. Nesse estudo de caso, a altitude elipsoidal foi o atributo de maior influência na variabilidade temporal da CEa, pois apresentou maior correlação com a componente temporal e apresentou médias distintas para as três classes geradas.

**Palavras-chave:** Variabilidade espacial, agricultura de precisão, estatística multivariada.

## **IDENTIFICATION OF FACTORS THAT DETERMINE THE TEMPORAL VARIABILITY OF SOIL APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY**

### **ABSTRACT**

The apparent soil electrical conductivity (ECa) represents an important attribute for evaluating the spatial variability of the fields, being associated with properties that determine

the loads available in the soil. This study aimed to evaluate the temporal variability of ECa using principal component analysis (PCA). In the same area, the ECa is sampled on three dates, which represent the input variables for PCA. We analyzed the correlations between the principal components (PC) and soil properties and ellipsoidal height measured with a GPS surveying. To identify the component that expresses the temporal variability of the ECa, we analyzed the correlations between the PC and the differences between the values of ECa of three dates. The second component was the one that best represented the temporal variability of the ECa and explained 18% of the total variance. This component showed a significant correlation of -0.39 with the ellipsoidal height, -0.25 with the cation exchange capacity (T) and 0.22 in the electrical conductivity of saturation extract (ECes). Spatial dependence was observed for the second CP, which generated three classes using fuzzy c-means interpolated from the map. The three classes had average values for different ellipsoidal height when evaluated their confidence intervals. The T was higher for the two classes with higher average elevation and ECes was higher for the class with the lowest average elevation. In this case study, the ellipsoidal height attribute was the greatest influence on temporal variability of the ECa, as most correlated with the time component and showed an average for the three different classes generated.

**Key words:** **Spatial variability**, precision agriculture, multivariate statistics.

## INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão procura manejar os campos considerando a variabilidade espacial de fatores que determinam a produtividade das culturas agrícolas. O manejo de atributos de fertilidade do solo geralmente são os que proporcionam maiores respostas à produção (MASVAYA *et al.*, 2010). Esse manejo consiste na aplicação de corretivos e fertilizantes, de acordo com as exigências nutricionais de cada cultura e a disponibilidade de nutrientes no solo. Alguns fertilizantes apresentam elevada mobilidade no solo e em condições de precipitações pluviométricas intensas podem ser mobilizados para outras camadas. Por esse motivo, fertilizantes nitrogenados e potássicos são aplicados em doses parceladas, em função de propriedades do solo que definem a mobilidade dos mesmos (TREMBLAY *et al.*, 2011). A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) é influenciada

pelo conteúdo de sais presentes na solução do solo e sua variabilidade temporal pode ser um bom indicativo da dinâmica das cargas do solo. Esse conhecimento é importante no planejamento da aplicação de fertilizantes com elevada mobilidade. Os atributos do solo normalmente associados ao transporte de nutrientes são capacidade de troca catiônica (T), textura do solo e atributos topográficos, como altitude e inclinação, além de fatores meteorológicos (KUMHÁLOVÁ *et al.*, 2011).

A CEa do solo tem sido uma técnica bastante aceita na agricultura de precisão devido a rapidez na aquisição dos dados, baixo custo e por ser correlacionada com vários atributos de interesse agrônômicos (SUDDUTH *et al.*, 2005; MORAL *et al.*, 2010). A facilidade no mapeamento da CEa a torna uma ferramenta importante para o monitoramento de atributos de solo correlacionados. O monitoramento da CEa durante o ciclo da cultura, considerando uma mesma condição de teor de água, pode apresentar uma parte de sua variância que é devido ao dinamismo das cargas do solo, proporcionado pela movimentação de água no mesmo. A topografia do terreno também influencia a condutividade hidráulica sendo determinante no conteúdo de água e sua movimentação no solo (SCHMIDT *et al.*, 2007) e no transporte de nutrientes (SILVA E ALEXANDRE, 2005).

A variabilidade temporal da CEa deve refletir a dinâmica das cargas do solo e pode apresentar dependência espacial. Caso a variabilidade temporal da CEa apresente dependência espacial, deve-se investigar os atributos do solo associados a movimentação de água e ao transporte de nutrientes. O conhecimento de regiões onde as perdas de nutrientes são maiores é útil para definir zonas com maior risco de perdas de fertilizantes por lixiviação e erosões (KUMHÁLOVÁ *et al.*, 2011). Assim, torna-se possível o manejo diferenciado de fertilizantes com elevada mobilidade por meio do parcelamento de suas doses de aplicação de acordo com a necessidade de cada zona. Para que isso seja possível, é necessário decompor a variabilidade da CEa, coletada em diferentes datas durante o ciclo da cultura e identificar a porção de sua variabilidade que é função das alterações no tempo. Isso pode ser realizado por meio da análise de componentes principais.

A análise de componentes principais consiste em uma técnica multivariada capaz de resumir as fontes de variabilidade de um conjunto de variáveis correlacionadas, identificando recombinações lineares ortogonais, apresentadas como novas variáveis descorrelacionadas (MORAL *et al.*, 2010). As componentes geradas a partir do monitoramento da CEa do solo podem representar a variabilidade espacial, temporal, além de fontes de variação aleatória. Segundo Li *et al.* (2008), o número de componentes principais geradas equivale ao número de

variáveis analisadas, mas geralmente a maior parte da variabilidade total dos dados é explicada pelos primeiros componentes.

Identificando a componente que define a variabilidade temporal da CEa, e este apresentando dependência espacial, é possível estratificá-lo em zona mais homogênea que podem esta associadas a dinâmica das cargas do solo. A utilização da teoria dos conjuntos Fuzzy para agrupamentos tem sido preferível para delimitar zonas mais homogêneas para atributos do solo (ODEH *et al.*, 1992; MORAL *et al.*, 2010). O número de zonas ou classes a serem geradas pode ser definido pela análise do Índice de Performance Fuzzy (FPI) e a Entropia de Partição Modificada (MPE) (GORSEVSKI *et al.*, 2003). Segundo Odeh *et al.* (1992) e Gorsevski *et al.* (2003), o número ideal de classes pode ser estimado a partir da minimização das duas medidas. Uma vez definidas zonas mais homogêneas para a componente que expressa a variabilidade temporal da CEa, deve-se avaliar o comportamento dos atributos correlacionados ao mesmo no interior de cada classe. Com isso pode-se inferir sobre as causas da variabilidade temporal da CEa e avaliar sua utilidade no manejo da cultura. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar a variabilidade temporal da CEa, por meio da análise de componentes principais e identificar os atributos do solo que mais influenciam nesse processo.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Descrição da área de estudo**

A área de estudo foi um talhão da fazenda “Andréia ou Sozinha”, localizada no município de Goianápolis, no Estado de Goiás, Centro Oeste do Brasil. A sede da fazenda encontra-se nas coordenadas 16°28’20” Sul e 49°00’32” Oeste. Segundo a classificação de Köppen (1928), o clima da região é do tipo Aw tropical úmido, caracterizado pelo inverno seco e o verão chuvoso. O município encontra-se a 1060 m de altitude, e a precipitação média anual varia entre 1200 a 1800 mm (GOIÁS, 2010). O solo na região é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo. A área de estudo foi cultivada no ano agrícola 2009/2010 com milho e a safra 2010/2011 foi cultivada com soja. O gráfico de precipitação pluviométrica para o período de amostragem é apresentado na Figura 1.

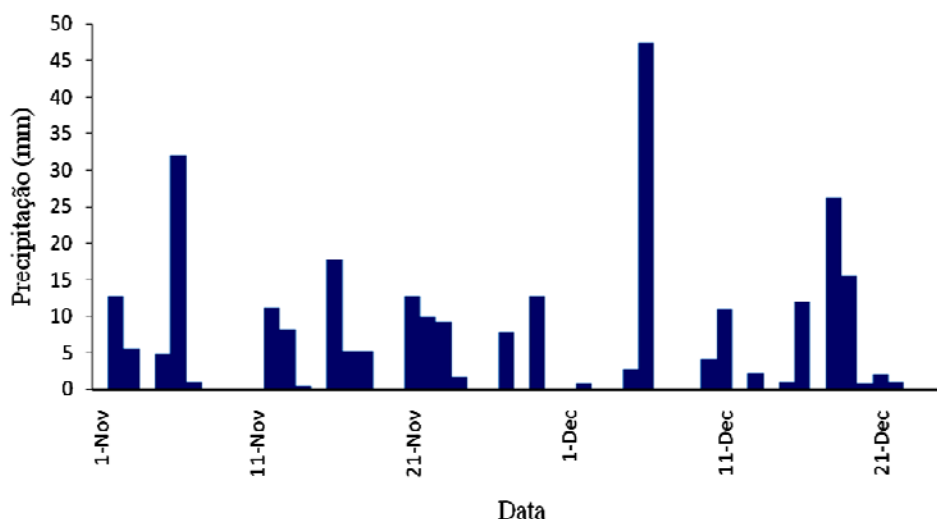


Figura 1: Precipitação pluviométrica registrada no período de amostragem de dados. Fonte: INPE, (2011).

### Coleta de dados

A delimitação da área experimental foi realizada com o auxílio de um GPS Topográfico da Marca Magellan, modelo Promark 3. Foi realizada a correção diferencial pós-processada utilizando a base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), localizada em Brasília. O Sistema de Informações Geográficas (SIG) utilizado foi o ArcGIS (Versão 9.3, da ESRI Inc., Redlands, CA, EUA). Com auxílio do SIG foi criada uma malha regular de pontos no interior da área de estudo, onde foram coletadas as amostras de CEa e de solo. O GPS foi utilizado para localização dos pontos amostrados em campo. A malha de pontos amostrados apresentou uma densidade de dois pontos por hectare em uma área de 75 hectares, perfazendo um total de 150 pontos. Em cada ponto foi registrado valor de altitude elipsoidal como auxílio do GPS, sendo realizada a correção diferencial pós-processada. Esse atributo foi utilizado para inferir sobre os efeitos relativo à posição dos pontos na paisagem sobre a variabilidade temporal da CEa.

A CEa do solo foi determinada nos dias 11/11/2010 (1ª data), 04/12/2010 (2ª data) e 13/12/2010 (3ª data), utilizando um aparelho portátil fabricado por Landviser, modelo LandMapper® ERM 02. O aparelho foi comparado com um condutivímetro de bancada apresentando coeficiente de correlação  $r = 0.98$  (Apêndice B). O LandMapper® ERM 02 utiliza o princípio da resistividade elétrica (RE), que é medida por meio do contato de quatro eletrodos com o solo. A configuração dos eletrodos utilizada foi a *Matriz de Wenner*, ajustada

de tal forma que as leituras representem a camada de 0 a 0,20 m de profundidade. Nessa configuração, os eletrodos são dispostos em linha e igualmente espaçados segundo descrito por Corwin e Lesch (2003). Cada ponto foi representado pela média de cinco subamostras a uma distância de até 5 m. Para cada data de amostragem de CEa, 30 amostras de solo foram tomadas na área, pesadas e levadas a estufa de ventilação forçada a uma temperatura de 105° onde permaneceram até atingir peso constante, sendo determinado o teor de água no solo para caracterizar as condições de amostragem.

As amostras de solo foram coletadas com auxílio de um trado de rosca, na profundidade de 0 a 0,20 m. Cada amostra foi composta por dez subamostras de solo, coletadas aleatoriamente a um raio de até 5 metros a partir do ponto. A análise química do solo foi composta de pH, acidez potencial (H + Al), teores de Ca, Mg, K, P, Al, P-rem, matéria orgânica, soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica CTC efetiva (t) e CTC total (T), saturação por bases (V), e os micro nutrientes Zn, Fe, Mn e Cu. Quanto à análise física foi determinada a textura do solo e quantificando os teores de argila, silte e areia total.

### **Análise temporal da CEa utilizando componentes principais**

Segundo Moral *et al.* (2010), com a análise de componentes principais é possível identificar combinações lineares ortogonais de variáveis correlacionadas que resumem as principais fontes de variabilidade dos dados. Nesse trabalho, a análise de componentes principais foi utilizada partindo da hipótese que alguma componente possa representar a variabilidade temporal da CEa. O pré-requisito de que as variáveis de entrada sejam correlacionadas entre si foi avaliado para as três datas de amostragem da CEa. A identificação da componente que melhor representa a variabilidade temporal da CEa foi realizada por meio da análise de correlação, considerando que essa componente deve apresentar elevada correlação com as diferença entre as medidas de CEa das três datas. Essas análises foram realizadas utilizando o programa SAS versão 9.2 (SAS Institute, 2008).

### **Análise de correlação entre a componente temporal da CEa e atributos físico-químicos do solo**

Foi avaliada as correlações existentes entre as componentes principais (CP) geradas a partir da CEa e os atributos físico-químicos do solo. Esse procedimento permite avaliar a quais atributos se refere a variância explicada pelas CPs.

### **Análise geoestatística para as componentes principais**

A variabilidade temporal da CEa tem sua importância agrônômica somente se apresentar estrutura de dependência espacial. Assim, fatores que definem a perda ou acréscimo das cargas no solo podem ser indiretamente avaliados e a delimitação de áreas com maior risco de perdas de fertilizantes por processo de lixiviação ou erosão é possível. A distribuição espacial das componentes geradas foi caracterizada utilizando técnicas de geoestatísticas presente no programa de computador GS+ versão 7.0 para Windows, desenvolvido por Gamma Design Software, LLC, Michigan, EUA (ROBERTSON, 1998). Os semivariogramas foram calculados considerando um comportamento isotrópico da dependência espacial. Os modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas experimentais visaram maximizar o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e reduzir a soma de quadrados do resíduo (SQR). Os mapas foram confeccionados utilizando o método de krigagem ordinária, para estimar os valores dos atributos nos locais não amostrados.

### **Análise de agrupamento Fuzzy c-means para a componente temporal da CE**

A componente temporal da CEa foi estratificada no campo pelo método de classificação Fuzzy c-means. Foi utilizado o programa de computador FuzME versão 3.5 (MINASNY e MCBRATNEY, 2002). O Índice de Performance Fuzzy (FPI) e a Entropia de Partição Modificada (MPE) foram utilizados para definir o número mais apropriados de grupos (ODEH *et al.*, 1992; FRIDGEN *et al.*, 2004; SUN *et al.*, 2011). Foi realizada a classificação com número de grupos variando de dois a cinco. Para cada classificação foi registrado os índices FPI e MPE. O número mais apropriado de classes, segundo Odeh *et al.* (1992), apresenta um menor FPI e uma maior organização nos grupos, que é expressa por uma menor MPE, obtida no processo de agrupamento.

## **Avaliação das zonas criadas a partir da componente principal que representa a variabilidade temporal da CEa**

Para cada classe gerada, foi calculado a média e o intervalo de confiança das variáveis correlacionadas com a componente que representa a variabilidade temporal da CEa. Para tanto, foram utilizadas as amostras de solo coletadas no interior de cada classe. Esse procedimento permitiu avaliar se as zonas apresentam médias distintas para os atributos correlacionados e o comportamento da CEa nas três datas em cada classe.

### **RESULTADOS**

O teor de água médio do solo para 1ª data foi 20,5 %, para a 2ª data foi 20,1 % e para a 3ª data foi 20,2 %, sendo que as mesmas não diferiram estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Esse resultado indica que a variação temporal da CEa nestas datas apresenta-se pouco influenciada pela variabilidade temporal do teor de água do solo. A CEa coletada nas três datas foram significativamente correlacionadas entre si, sendo o coeficiente de correlação da 1ª data com a 2ª data igual a 0,52, da 1ª data com a 3ª data igual a 0,52 e da 2ª data com a 3ª data igual a 0,77. Na Tabela 1 são descritas os valores médios de CEa nas três datas, considerando 150 pontos amostrais.

Tabela 1: Média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação da CEa amostrada em três datas.

|         | Média (mS. m <sup>-1</sup> ) | Desvio Padrão | Coeficiente de variação (%) |
|---------|------------------------------|---------------|-----------------------------|
| 1ª data | 4,83                         | 0,94          | 19,51                       |
| 2ª data | 4,50                         | 1,06          | 23,46                       |
| 3ª data | 3,93                         | 0,83          | 21,24                       |

A PCA foi realizada tendo com variáveis de entrada a CEa amostrada em três épocas durante o ciclo da cultura e resultou em três componentes cujos autovalores são apresentados na Tabela 2. Esses resultados mostram que 92% da variância total dos dados foram explicadas pelas duas primeiras componentes, sendo que a primeira componente explicou sozinha 74% e a segunda componente explicou 18% da variância total.

Tabela 2: Autovalores das componentes principais geradas a partir da CEa.

| PC   | Variância (Autovalor) | Porcentagem da Variância total (%) | Porcentagem acumulada da variância (%) |
|------|-----------------------|------------------------------------|--|
| CP 1 | 2,22                  | 74                                 | 74                                     |
| CP 2 | 0,55                  | 18                                 | 92                                     |
| CP 3 | 0,23                  | 8                                  | 100                                    |

Na Tabela 3 são apresentados os autovetores (pesos) atribuídos aos valores de CEa amostradas em cada data para dar origem aos escores das CP geradas. Para a CP1 foram atribuídos pesos semelhantes para as três datas de amostragem. Para a CP2 atribuiu-se um peso negativo para a 1ª data de amostragem e pesos positivos e menores para a 2ª e 3ª data de amostragem. Essa CP expressa um contraste entre os valores de CEa no início da temporada das chuvas para as datas posteriores. Já a CP 3 representa um contraste entre a CEa amostradas na 2ª e 3ª data.

Tabela 3: Pesos atribuídos a CEa, amostradas em diferentes datas, na composição das CP.

| CEa     | CP 1 | CP 2  | CP 3  |
|---------|------|-------|-------|
| 1ª data | 0,52 | -0,86 | 0,00  |
| 2ª data | 0,60 | 0,37  | 0,71  |
| 3ª data | 0,61 | 0,36  | -0,71 |

As diferenças entre os valores de CEa calculadas para as combinações das três datas de amostragem foram submetidas a análise de correlação com os escores das CP geradas. Os resultados dessa análise apresentados na Tabela 4, mostram que a CP 2, que explicou 18% da variância total, se correlacionou significativamente com as diferenças entre os valores de CEa para os contrastes (2ª data – 1ª data) e (3ª data – 1ª data). A CP 3 correlacionou significativamente com todos os contrastes e apresentou maior coeficiente de correlação para o contraste (3ª data – 2ª data). Já a CP 1, não se correlacionou significativamente apenas com o contraste (3ª data – 1ª data).

Tabela 4: Correlação entre os escores das CP e os contrastes gerados pelas diferenças entre os valores de CEa nas três datas de amostragem.

| $(\Delta CE)$     | CP 1  |         | CP 2  |         | CP 3  |         |
|-------------------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
|                   | r     | p-valor | r     | p-valor | r     | p-valor |
| 2ª data - 1ª data | 0,23  | 0,006   | 0,91  | <0,001  | 0,36  | <0,001  |
| 3ª data - 1ª data | 0,03  | 0,719   | 0,95  | <0,001  | -0,32 | <0,001  |
| 3ª data - 2ª data | -0,30 | 0,000   | -0,10 | 0,246   | -0,95 | <0,001  |

( $\Delta CE$ ) – datas que foram utilizadas para calcular a diferença entre os valores de CEa; r – coeficiente de correlação; p-valor – probabilidade de aceitar  $H_0$  ( $r = 0$ ).

As relações entre as CP e os atributos físico-químicos do solo foram avaliadas por meio de análise de correlação de Pearson. Os resultados dessa análise são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Análise de correlação entre as CP e os atributos do solo.

|          | CP 1  |         | CP 2  |         | CP 3  |         |
|----------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
|          | r     | p-valor | r     | p-valor | r     | p-valor |
| pH       | 0,43  | <0,001  | 0,06  | 0,442   | -0,03 | 0,722   |
| P        | -0,16 | 0,064   | -0,10 | 0,222   | -0,06 | 0,513   |
| K        | 0,01  | 0,921   | 0,06  | 0,478   | 0,02  | 0,836   |
| Ca       | 0,46  | <0,001  | -0,16 | 0,059   | -0,06 | 0,479   |
| Mg       | 0,56  | <0,001  | -0,10 | 0,232   | -0,15 | 0,070   |
| SB       | 0,52  | <0,001  | -0,15 | 0,068   | -0,09 | 0,311   |
| H_Al     | -0,30 | <0,001  | -0,14 | 0,088   | -0,04 | 0,667   |
| t        | 0,52  | <0,001  | -0,15 | 0,068   | -0,09 | 0,311   |
| T        | 0,01  | 0,940   | -0,25 | 0,003   | -0,09 | 0,276   |
| V        | 0,37  | <0,001  | 0,11  | 0,200   | -0,04 | 0,599   |
| MO       | 0,17  | 0,049   | -0,12 | 0,150   | -0,10 | 0,257   |
| P_rem    | -0,37 | <0,001  | -0,09 | 0,273   | -0,06 | 0,466   |
| Zn       | 0,23  | 0,006   | -0,08 | 0,336   | -0,17 | 0,041   |
| Cu       | -0,01 | 0,918   | 0,14  | 0,102   | 0,09  | 0,292   |
| Fe       | -0,20 | 0,016   | 0,05  | 0,568   | 0,01  | 0,887   |
| Mn       | 0,19  | 0,021   | 0,15  | 0,077   | 0,00  | 0,979   |
| B        | 0,13  | 0,126   | -0,03 | 0,724   | 0,01  | 0,914   |
| S        | -0,14 | 0,089   | -0,01 | 0,885   | 0,02  | 0,846   |
| Altitude | 0,06  | 0,447   | -0,39 | 0,000   | -0,06 | 0,450   |
| Argila   | 0,26  | 0,002   | 0,04  | 0,671   | 0,00  | 0,958   |
| Silte    | 0,22  | 0,010   | 0,08  | 0,343   | -0,06 | 0,457   |
| Areia    | -0,34 | <0,001  | -0,08 | 0,335   | 0,04  | 0,646   |
| CEes     | 0,00  | 0,974   | 0,22  | 0,007   | -0,06 | 0,486   |

r – coeficiente de correlação; p-valor – probabilidade de aceitar  $H_0$  ( $r = 0$ ); pH - potencial hidrogeniônico; P – fósforo; K – potássio; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; SB – Soma de bases; H + Al – Ácidos potencial; t – Capacidade de troca catiônica efetiva; T – Capacidade de troca catiônica potencial; V – Saturação por bases; MO – Matéria orgânica; P-rem – Fósforo remanescente; Zn – Zinco; Cu – Cobre; Fe – Ferro; Mn – Manganês; B – boro; S – Enxofre; CEes – Condutividade elétrica do extrato de saturação.

Os resultados apresentados na Tabela 5 mostram que a primeira componente apresentou um maior número de correlações significativas, ao nível de 5% de probabilidade, em relação às demais componentes. A CP 2, que mais se correlacionou com os contrastes entre os valores de CEa amostrados nas três datas, apresentou correlação significativa somente com a T do solo, altitude e CEes. Já a CP3 correlacionou-se somente com o micronutriente Zn. A Tabela 6 mostra os resultados da análise da variabilidade espacial das CP1 e CP2, geradas a partir da CEa amostrada nas três datas. A CP3 não apresentou estrutura

de dependência espacial não sendo possível ajustar um modelo matemático ao semivariograma.

Tabela 6: Parâmetros dos semivariogramas e validação cruzada para as CP.

|      | Modelo    | R <sup>2</sup> | Ajuste de semivariogramas |        |         |       | Validação cruzada da krigagem |                |
|------|-----------|----------------|---------------------------|--------|---------|-------|-------------------------------|----------------|
|      |           |                | Co                        | (Co+C) | IDE (%) | A (m) | Coef. angular                 | R <sup>2</sup> |
| CP 1 | Gaussiano | 0,941          | 0,956                     | 2,246  | 57,4    | 200   | 0,841                         | 0,273          |
| CP 2 | Gaussiano | 0,964          | 0,347                     | 2,704  | 87,2    | 2944  | 1,023                         | 0,257          |

R<sup>2</sup> - coeficiente de determinação; Co – efeito pepita; (Co+C) – patamar; IDE - índice de dependência espacial de Zimback, (2001)  $C/(Co+C)^*100$ ; A (m) - alcance da dependência espacial em metros.

A segunda componente apresentou uma forte dependência espacial, com IDE inferior a 0,75 (ZIMBACK, 2001) e um elevado ajuste para o modelo Gaussiano. A primeira componente apresentou uma moderada dependência espacial, com um alcance de apenas 200 metros. Como a segunda componente foi mais associada à variabilidade temporal da CEa, pois foi a que mais se correlacionou com as diferenças entre as CEa das três datas, foi realizada sua classificação pelo método fuzzy c-means para identificar agrupamentos em que a mesma apresenta-se mais homogênea. O número de classes foi determinado pela análise dos índices FPI e MPE apresentados na Figura 2.

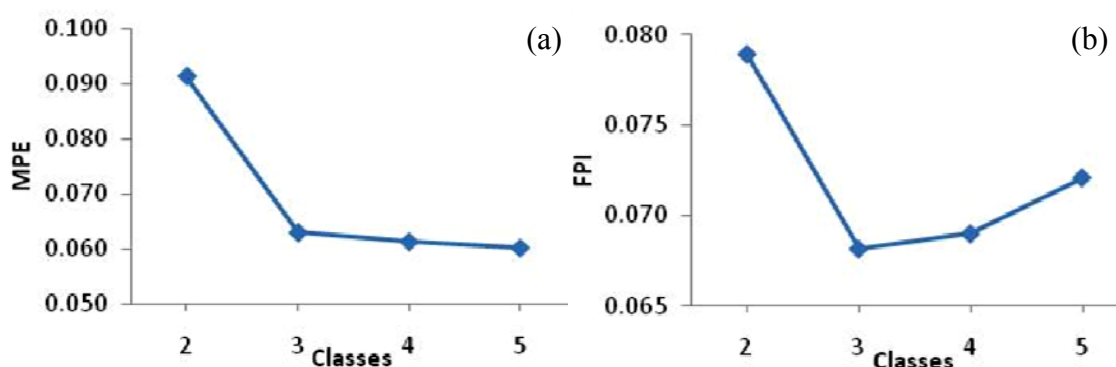


Figura 2: Índice de Performance Fuzzy (FPI) (a) e Entropia de partição modificado (MPE) (b), para a CP 2.

Os índices apresentados na Figura 2 sugerem o número de três classes como sendo o mais apropriado. Pode-se observar que para o número de três classes tem-se o ponto em que ambos os índices são baixos. Na Figura 3 encontra-se o mapa da CP 2, delimitado para as três classes onde os escores dessa componente são mais homogêneos. A CP 2 foi obtida pela equação:  $CP\ 2 = -0,86*(CEa\ da\ 1^{a}\ data) + 0,37*(CEa\ da\ 2^{a}\ data) + 0,36*(CEa\ da\ 3^{a}\ data)$ .

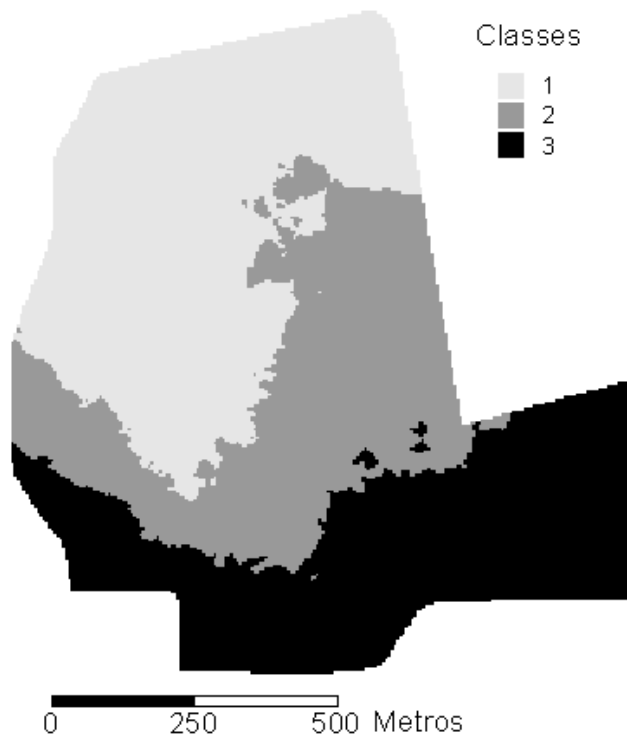


Figura 3: Agrupamento da CP 2 em três classes geradas por fuzzy c-means.

Os resultados apresentados sugerem que a CEa apresenta variações no tempo, porém, essa variabilidade ocorre com diferentes intensidades no campo de produção. A componente que expressa a variabilidade temporal da CEa foi agrupada em três classes onde se espera que a CEa varie temporalmente com diferentes intensidades. A Figura 4 apresenta a distribuição de probabilidade da média da CEa nas três classes e para as três datas avaliadas, considerando a distribuição normal de probabilidade e o erro padrão.

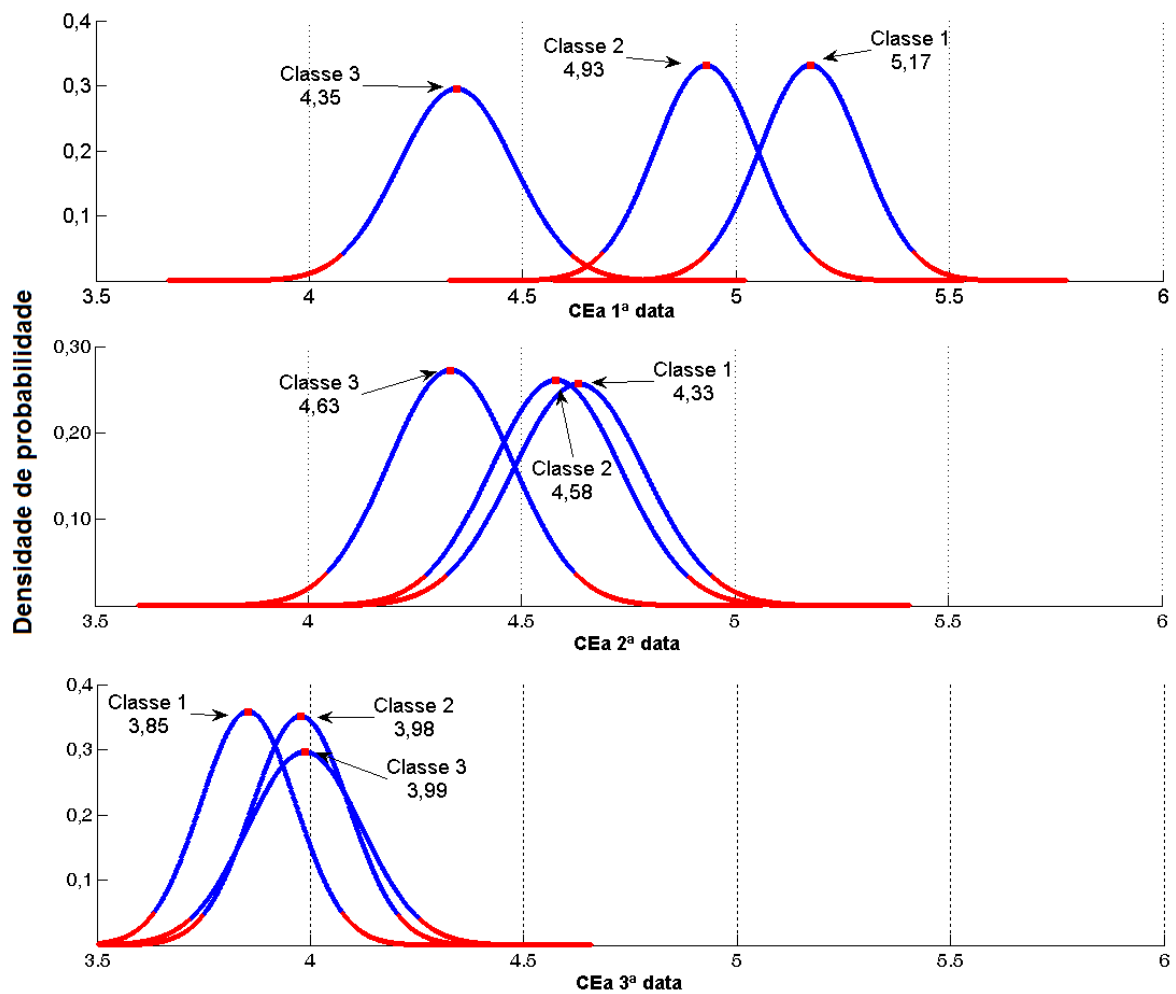


Figura 4: Função densidade de probabilidade para a média da CEA ( $\text{mS. m}^{-1}$ ) nas três datas. As partes das curvas em vermelho representam as regiões de rejeição da hipótese da nulidade considerando um intervalo de confiança de 95 %.

Os atributos do solo que se correlacionaram com a segunda componente foram a T, altitude e CEes. Para melhor compreender o comportamento desses atributos nas classes formadas a partir da CP2, foram avaliados os pontos amostrados no interior de cada classe para os três atributos correlacionados e para a CEA amostradas nas três datas. Foi utilizada a grade de amostragem de 150 pontos para toda a área, a classe 1 apresentou 57 pontos, a classe 2 com 38 pontos e a classe 3 com 48 pontos amostrados. Na figura 5 são apresentadas as médias e os intervalos de confiança desses atributos, descritas em função da distribuição normal de probabilidade.

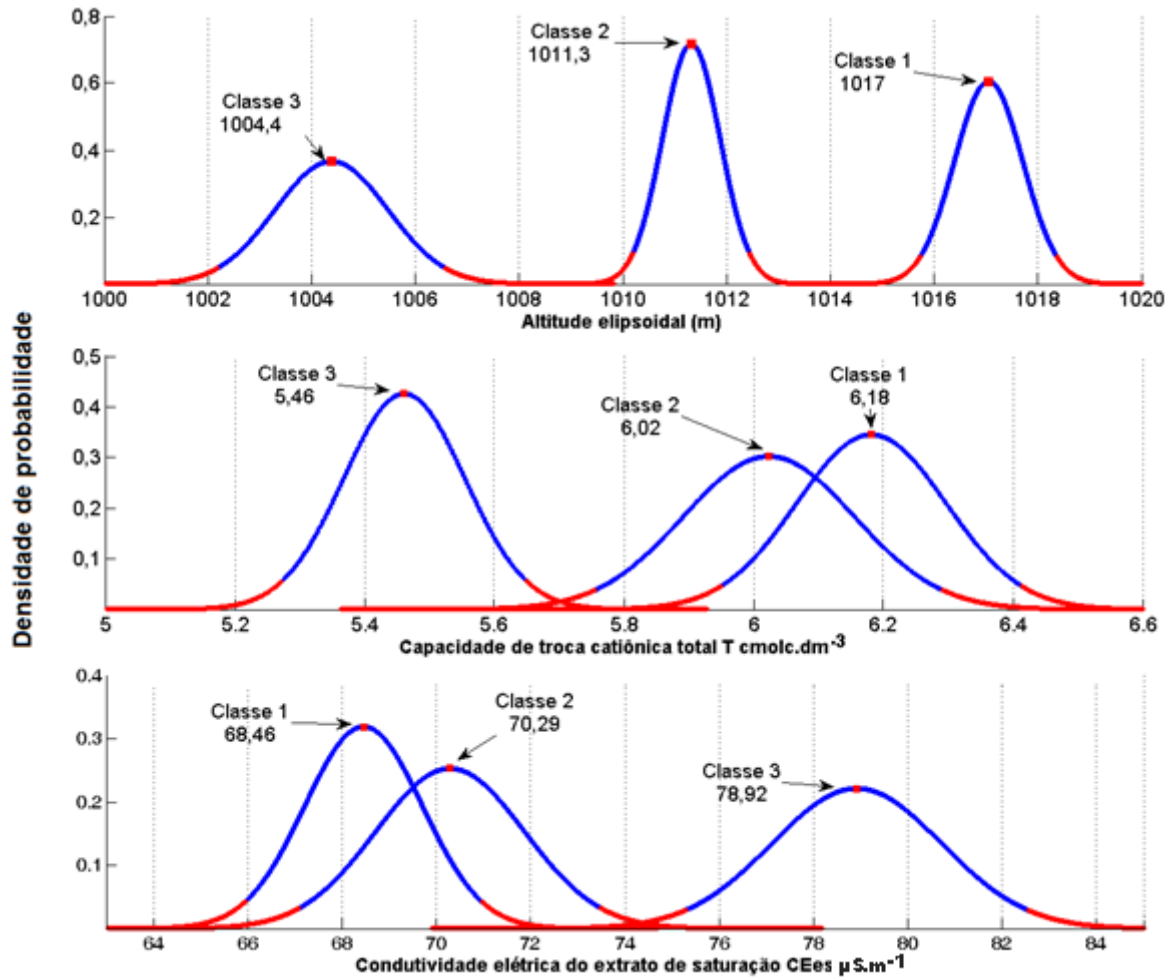


Figura 5: Função densidade de probabilidade para a média dos atributos correlacionados com a CP2. As partes das curvas em vermelho representam as regiões de rejeição da hipótese da nulidade considerando um intervalo de confiança de 95 %.

Pode se observar na figura 5 que a classe três caracteriza-se pela menor altitude e uma maior CEes, porem uma menor T. Esse resultado instiga a investigar as causas de uma menor T nessa classe, que apresentou valores CEes mais elevados. A matéria orgânica do solo e o teor de argila são normalmente relacionados à T do solo e apresentaram coeficientes de correlação de 0,71 e 0,29 respectivamente. O comportamento desses atributos nas classes de variabilidade temporal da CEa são apresentados na figura 6.

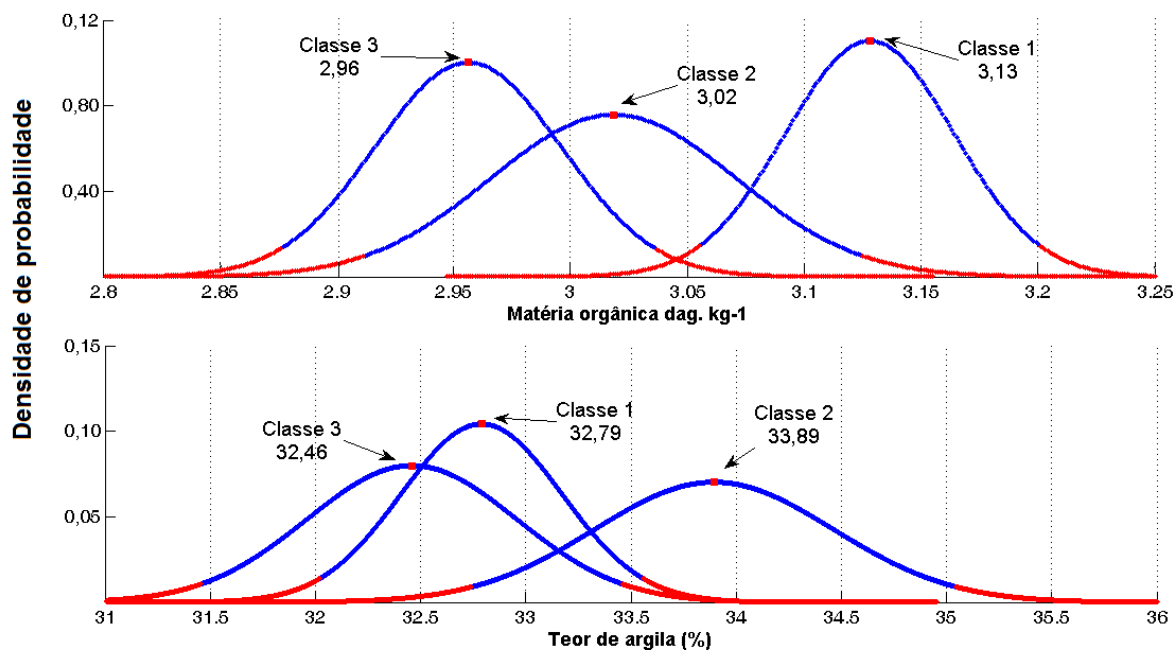


Figura 6: Função densidade de probabilidade para a média do teor de argila e da matéria orgânica do solo. As partes das curvas em vermelho representam as regiões de rejeição da hipótese da nulidade considerando um intervalo de confiança de 95 %.

## DISCUSSÃO

Esse trabalho utilizou dados de CEa amostrados em um mesmo campo, em diferentes datas e com valor médio do teor de água semelhante. Devido às precipitações pluviométricas nesse período era esperado que as condições de cargas do solo fossem alteradas devido ao transporte de nutrientes via movimentação da água no solo. A PCA foi capaz de identificar uma porção da variabilidade da CEa proporcionada por sua alteração no tempo. Isso é evidenciado pela elevada correlação entre a CP 2 e as diferenças entre os valores de CEa da 1ª data com a 2ª data e da 1ª data com a 3ª data. Isso demonstra que a dinâmica das cargas do solo, representada pelas diferenças dos valores de CEa nos mesmos locais, pode ser identificada por meio da análise de componentes principais.

A forte estrutura de dependência espacial apresentada pela CP 2 sugere a existência de um padrão espacial na dinâmica das cargas do solo. Sendo assim, a estratificação dessa componente em regiões mais homogêneas pode ser utilizada como zonas para o manejo de fertilizantes com elevada mobilidade no solo. Entretanto, amostras de solo devem ser analisadas no interior de cada zona para determinação do manejo mais apropriado para as mesmas.

Nesse trabalho, a CP2 representou a variabilidade temporal de CEa e foi correlacionada com a T do solo, a CEes e a Altitude. Esses atributos foram amostrados no

início do período chuvoso, sendo assim, expressam as condições iniciais do solo e o equilíbrio obtido na safra anterior, que foi cultivada com milho. Tanto a CEa, CEes e a T do solo são atributos dinâmicos, já a altitude é estática, ou seja, não varia com o tempo. Sendo assim, a altitude pode ser considerada o atributo determinante da dinâmica das cargas do solo para as condições desse estudo, refletindo nas variações da CEa, CEes e T. Kumhálová *et al.* (2011) observaram correlação entre produtividade de milho e acúmulo de nutrientes com a topografia do terreno. Iqbal *et al.* (2005) também relataram que a topografia tem um efeito sobre a variação espacial de atributos hidrológicos do solo e produtividade das culturas.

As zonas geradas pela componente que expressa a variabilidade temporal da CEa foi avaliada a partir de amostras de solo coletadas no interior de cada zona. Taylor *et al.* (2007) discorrem sobre a comparação entre as zonas por meio do intervalo de confiança gerado a partir dos erros de predição dos mapas interpolados por krigagem. Para os autores, as zonas podem ser consideradas distintas quando não há sobreposição entre seus intervalos de confiança. Nesse trabalho o número de amostras coletadas nas zonas foi suficiente para o cálculo do intervalo de confiança (IC) considerando a distribuição normal. Assim, esse parâmetro foi utilizado para comparar atributos de interesse entre as zonas geradas a partir da CP2, que representa a variabilidade temporal da CEa.

A análise de classificação fuzzy c-means identificou um padrão com três classes onde a CP 2 apresentou-se mais homogênea. O comportamento da CEa em cada classe, nas três datas mostram que a classe 1 foi a que mais reduziu os valores de CEa acompanhada pela classe 2 (Figura 4). As três classes geradas apresentaram uma altitude média distinta, que é observada pela não existência de interseção entre os IC das mesmas. As duas classes em que a altitude foi maior apresentaram CEes menores, essas, apresentaram sobreposição de seus IC. O mesmo foi observado para T do solo, que foi maior nas duas classes que apresentaram maior altitude.

A classe que apresentou uma menor altitude foi caracterizada por uma maior CEes e uma menor T. A maior CEes pode ser atribuída ao fluxo de água no solo e seus efeitos no transporte de nutrientes como fertilizantes nitrogenados e potássicos, sendo esse fluxo maior nas regiões mais altas. Deve-se ressaltar que essas amostras foram coletadas no início do período chuvoso, sendo assim, reflete o equilíbrio obtido no último ano agrícola, que foi cultivado com milho. Um das operações de manejo da cultura do milho é a adubação de cobertura com fertilizantes a base de nitrogênio e potássio. Uma hipótese para o menor valor de T na região mais baixa pode ser atribuída a uma maior atividade dos micro-organismos do

solo, devido a maior disponibilidade desses nutrientes nessa região. Isso ocasionaria uma maior mineralização da MO, disponibilizando mais sais para a solução do solo e reduzindo a T, que nas condições de Cerrado brasileiro é determinada principalmente pela MO. Entretanto, a T é também influenciada pelo teor de argila. Pode-se observar na Figura 6 que a MO apresentou uma menor média para a classe 3 que se diferenciou da classe 1, porém a classe 2 apresentou-se muito dispersa, não se diferenciando das demais. Em relação à argila, embora não significativo, observa-se uma tendência da classe 2 ser mais argilosa. O menor valor de T na classe 3 em relação às demais classes, pode ser reflexo da interação entre os atributos argila e MO.

## **CONCLUSÕES**

Esse trabalho procurou avaliar a variabilidade temporal da CEa por meio da análise de componentes principais. Essa análise identificou uma componente fortemente correlacionada com as diferenças entre os valores de CEa das três datas avaliadas.

A componente principal que descreveu a variabilidade temporal da CEa correlacionou significativamente com T do solo, a CEes e com a Altitude (relativo a posição na paisagem). Três classes foram geradas a partir dessa componente por meio da classificação fuzzy. A altitude apresentou médias distintas para as três classes e foi considerada o atributo determinante da variabilidade temporal da CEa. A CEes foi maior para a classe cuja altitude média foi menor e a T do solo foi menor para a classe de menor altitude média.

A análise de componentes principais foi capaz de identificar a fração da variabilidade da CEa proporcionada por sua variabilidade temporal. Essa nova variável pode ser utilizada como critério para definir zonas de manejo para fertilizantes com elevada mobilidade no solo, tais como os nitrogenados e potássicos, pois apresentou estrutura de dependência espacial e foi correlacionada com T, Altitude e CEes.

## **AGRADECIMENTOS**

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio concedido ao Programa PROCAD UFV-UEG que possibilitou a realização desse trabalho. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela

bolsa concedida. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro à realização da pesquisa.

## LITERATURA CITADA

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

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 455-471, 2003.

FRIDGEN, J. J.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T.; WIEBOLD, W. J.; FRAISSE, C. W. Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 1, p. 100-108, 2004.

GOIÁS. Secretaria de planejamento e desenvolvimento. Bacias Hidrográficas. Superintendência de Estatística, Pesquisa e Informação. Goiânia: SEPLAN/. Disponível em: <<http://www.seplan.go.gov.br/sepim/pub/anuario/2003/SITUACAOFISICA/tabela11.htm>>. Acessado em 15 Out 2010

GORSEVSKI, P. V.; GESSLER, P. E.; JANKOWSKI, P. Integrating a fuzzy c-means classification and a Bayesian approach for spatial prediction of landslide hazard. **Journal of Geographical Systems**, v. 5, n. 3, p. 223-251, 2003.

IQBAL, J.; READ, J. J.; THOMASSON, A. J.; JENKINS, J. N. Relationships between Soil and Landscape and Dryland Cotton Lint Yield. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 69, n. 3, p. 872-882, 2005.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Sistema Nacional de Dados Ambientais :SINDA. Disponível em: <[http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/historico/consulta\\_pcdm.jsp](http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/historico/consulta_pcdm.jsp)>. Acessado em 25 Jan 2011

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm.

KUMHÁLOVÁ, J.; KUMHÁLA, F.; KROULÍK, M.; MATĚJKOVÁ, S. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. **Precision Agriculture**, p. 1-18, 2011.

LI, Y.; SHI, Z.; LI, F.; LI, H.-Y. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 56, n. 2, p. 174-186, 2008.

MASVAYA, E. N.; NYAMANGARA, J.; NYAWASHA, R. W.; ZINGORE, S.; DELVE, R. J.; GILLER, K. E. Nitrogen and phosphorus capture and recovery efficiencies, and crop

responses to a range of soil fertility management strategies in sub-Saharan Africa. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 88, n. 1, p. 111-120, Sep 2010.

SILVA, J. R. M.; ALEXANDRE, C.. Spatial variability of irrigated corn yield in relation to field topography and soil chemical characteristics. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 5, p. 453-466, 2005.

MINASNY, B., MCBRATNEY, A.B., 2002. FuzME version 3.0, Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, Australia.  
(<http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>).

MORAL, F. J.; TERRON, J. M.; SILVA, J. R. M. D. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil and Tillage Research**, P.O. Box 211, Amsterdam, 1000 AE, Netherlands, v. 106, n. 2, p. 335-343, 2010.

ODEH, I. O. A.; MCBRATNEY, A. B.; CHITTLEBOROUGH, D. J. Soil pattern recognition with fuzzy-c-means: application to classification and soil-landform interrelationships. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 2, p. 505-516, 1992.

ROBERTSON, G.P.; GS+ Geostatistics for Environmental Science User Manual. Gamma Design Software. Version 3.1. Plainwell, MI, 1998.

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**, v. 46, n. 1-3 SPEC. ISS., p. 263-283, 2005.

SCHMIDT, J. P.; HONG, N.; DELLINGER, A.; BEEGLE, D. B.; LIN, H. Hillslope variability in corn response to nitrogen linked to in-season soil moisture redistribution. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 1, p. 229-237, 2007.

SUN, X.-L.; ZHAO, Y.-G.; WANG, H.-L.; YANG, L.; QIN, C.-Z.; ZHU, A. X.; ZHANG, G.-L.; PEI, T.; LI, B.-L. Sensitivity of digital soil maps based on FCM to the fuzzy exponent and the number of clusters. **Geoderma**, 2011, doi:10.1016/j.geoderma.2011.03.016.

TAYLOR, J. A.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. Establishing management classes for broadacre agricultural production. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 5, p. 1366-1376, 2007.

TREMBLAY, N.; BOUROUBI, M. Y.; VIGNEAULT, P.; BÉLEC, C. Guidelines for in-season nitrogen application for maize (*Zea mays* L.) based on soil and terrain properties. **Field Crops Research**, 2011.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 f. (Livro-Docência em Levantamento do Solo e Fotopedologia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.



## CONCLUSÕES GERAIS

Esse trabalho buscou avaliar a CEa do solo em uma região de cerrado, cultivada com soja. Amostragens de CEa foram realizadas durante o ciclo da cultura com um medidor de CEa portátil, auxiliado por um GPS. Buscou-se avaliar a condição de amostragem em que CEa mais se correlacionasse com atributos do solo, considerando a influência do teor de água do solo. A amostragem que apresentou melhores resultados foi submetida à análise da variabilidade espacial e as classes geradas pelo método Fuzzy de classificação foram avaliadas para os atributos correlacionados com a CEa do solo. Também foi realizada a análise temporal da CEa por meio da análise de componentes principais, visando identificar e avaliar as alterações dos valores de CEa no tempo.

O teor de água do solo proporcionou grande influência na CEa média da área em estudo, apresentando uma forte correlação positiva. Entretanto, à medida que o teor de água médio do solo foi maior, menor foi o seu CV na área e menor foi sua correlação com a CEa. A amostragem em que a CEa apresentou-se mais correlacionada com os atributos do solo, foi a que apresentou uma menor correlação com o teor de água do solo. Nessa amostragem o teor de água médio do solo foi maior e seu CV foi menor. Essa amostragem foi considerada mais apropriada para análise da variabilidade do solo.

A segunda parte do trabalho buscou extrair informações relevantes a partir dos dados de CEa, da amostragem que mais se correlacionou com os atributos do solo. A análise de agrupamentos fuzzy classificou o mapa interpolado de CEa em 4 classes. As classes de CEa foram caracterizadas a partir de cinco amostras de solo em cada classe. O método utilizado para unir classes com médias estatisticamente iguais gerou um padrão de duas zonas distintas para pH, V, (H+Al), Fe e T. Essas variáveis foram correlacionadas com a CEa e apresentaram um elevado índice de dependência espacial. O método apresentou bons resultados, pois quando comparado com a classificação fuzzy para os mapas interpolados dos atributos, o coeficiente Kappa para a classificação foi “muito bom” para pH, V, (H+Al) e Fe e “bom” para T.

A terceira parte do trabalho avaliou a variabilidade temporal da CEa do solo. A análise de componentes principais utilizando três datas de coletas com teor de água médio do solo semelhante, gerou uma componente fortemente correlacionada com as diferenças nos valores de CEa entres três datas. Essa componente explicou 18 % da variância total dos dados e foi correlacionada com a altitude, T e com a CEes. Três zonas de manejo foram delimitadas por meio da classificação fuzzy, sendo que as médias de altitude das três zonas foram distintas. Como a altitude é um atributo que não varia no tempo, pode-se considerar que a variabilidade temporal da CEa foi influenciada principalmente pela variabilidade espacial da altitude. A zona com menor altitude média apresentou maior CEes, e uma menor T, para amostras de solo obtidas no início do período chuvoso.

Nas condições desse trabalho, a CEa mostrou-se um atributo correlacionado a atributos do solo, importantes para o manejo das culturas, sendo uma boa informação para gerar zonas de manejo. Entretanto, para uma melhor interpretação de mapas de CEa, torna-se necessário avaliar o teor de água do solo no momento da amostragem.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A

Tabela 1: Matriz de correlação para os atributos químicos do solo.

|              |         | pH    | P     | K     | Ca    | Mg    | H+Al  | SB    | t     | T     | V     | MO    | P-rem | Zn    | Cu    | Fe    | Mn    | B     | S     |
|--------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>pH</b>    | r       | 1.00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|              | p-valor | 0.000 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>P</b>     | r       | -0.04 | 1.00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|              | p-valor | 0.678 | 0.000 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>K</b>     | r       | -0.32 | 0.00  | 1.00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|              | p-valor | 0.000 | 0.979 | 0.000 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>Ca</b>    | r       | 0.66  | 0.18  | -0.09 | 1.00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|              | p-valor | 0.000 | 0.030 | 0.278 | 0.000 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>Mg</b>    | r       | 0.39  | 0.01  | 0.01  | 0.61  | 1.00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|              | p-valor | 0.000 | 0.880 | 0.937 | 0.000 | 0.000 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>H+Al</b>  | r       | -0.82 | 0.05  | 0.38  | -0.44 | -0.18 | 1.00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|              | p-valor | 0.000 | 0.569 | 0.000 | 0.000 | 0.029 | 0.000 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>SB</b>    | r       | 0.62  | 0.16  | -0.01 | 0.98  | 0.75  | -0.39 | 1.00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|              | p-valor | 0.000 | 0.063 | 0.939 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>t</b>     | r       | 0.62  | 0.16  | -0.01 | 0.98  | 0.75  | -0.39 | 1.00  | 1.00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|              | p-valor | 0.000 | 0.063 | 0.939 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>T</b>     | r       | -0.48 | 0.15  | 0.40  | 0.14  | 0.27  | 0.82  | 0.21  | 0.21  | 1.00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|              | p-valor | 0.000 | 0.078 | 0.000 | 0.089 | 0.001 | 0.000 | 0.011 | 0.011 | 0.000 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>V</b>     | r       | 0.88  | 0.00  | -0.33 | 0.64  | 0.36  | -0.95 | 0.60  | 0.60  | -0.63 | 1.00  |       |       |       |       |       |       |       |       |
|              | p-valor | 0.000 | 0.977 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>MO</b>    | r       | -0.34 | 0.00  | 0.28  | 0.19  | 0.44  | 0.50  | 0.28  | 0.28  | 0.71  | -0.32 | 1.00  |       |       |       |       |       |       |       |
|              | p-valor | 0.000 | 0.954 | 0.001 | 0.024 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>P-rem</b> | r       | -0.17 | 0.28  | -0.20 | -0.31 | -0.42 | -0.02 | -0.37 | -0.37 | -0.25 | -0.07 | -0.39 | 1.00  |       |       |       |       |       |       |
|              | p-valor | 0.045 | 0.001 | 0.019 | 0.000 | 0.000 | 0.822 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.423 | 0.000 | 0.000 |       |       |       |       |       |       |
| <b>Zn</b>    | r       | 0.15  | 0.25  | 0.05  | 0.33  | 0.29  | -0.02 | 0.35  | 0.35  | 0.19  | 0.12  | 0.13  | -0.16 | 1.00  |       |       |       |       |       |
|              | p-valor | 0.071 | 0.003 | 0.546 | 0.000 | 0.000 | 0.787 | 0.000 | 0.000 | 0.021 | 0.162 | 0.130 | 0.051 | 0.000 |       |       |       |       |       |
| <b>Cu</b>    | r       | -0.16 | 0.06  | 0.12  | -0.06 | 0.02  | 0.15  | -0.04 | -0.04 | 0.14  | -0.17 | 0.18  | -0.22 | 0.14  | 1.00  |       |       |       |       |
|              | p-valor | 0.064 | 0.473 | 0.158 | 0.495 | 0.830 | 0.073 | 0.672 | 0.672 | 0.102 | 0.041 | 0.036 | 0.009 | 0.089 | 0.000 |       |       |       |       |
| <b>Fe</b>    | r       | -0.43 | 0.06  | 0.03  | -0.44 | -0.37 | 0.29  | -0.46 | -0.46 | 0.02  | -0.38 | -0.07 | 0.40  | -0.22 | 0.06  | 1.00  |       |       |       |
|              | p-valor | 0.000 | 0.477 | 0.724 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.835 | 0.000 | 0.374 | 0.000 | 0.009 | 0.504 | 0.000 |       |       |       |
| <b>Mn</b>    | r       | 0.02  | -0.19 | 0.08  | 0.10  | 0.34  | 0.18  | 0.17  | 0.17  | 0.30  | -0.07 | 0.33  | -0.32 | -0.02 | 0.16  | -0.11 | 1.00  |       |       |
|              | p-valor | 0.807 | 0.021 | 0.341 | 0.257 | 0.000 | 0.028 | 0.049 | 0.049 | 0.000 | 0.381 | 0.000 | 0.000 | 0.778 | 0.060 | 0.182 | 0.000 |       |       |
| <b>B</b>     | r       | 0.04  | -0.06 | 0.31  | 0.06  | 0.13  | 0.11  | 0.10  | 0.10  | 0.18  | -0.06 | -0.02 | -0.21 | 0.14  | 0.07  | -0.19 | 0.22  | 1.00  |       |
|              | p-valor | 0.609 | 0.475 | 0.000 | 0.483 | 0.132 | 0.182 | 0.232 | 0.232 | 0.030 | 0.473 | 0.804 | 0.014 | 0.084 | 0.402 | 0.025 | 0.009 | 0.000 |       |
| <b>S</b>     | r       | -0.09 | 0.19  | 0.02  | 0.08  | -0.04 | 0.18  | 0.06  | 0.06  | 0.23  | -0.13 | 0.01  | 0.08  | 0.03  | -0.04 | 0.20  | -0.01 | 0.07  | 1.00  |
|              | p-valor | 0.304 | 0.025 | 0.788 | 0.349 | 0.596 | 0.029 | 0.496 | 0.496 | 0.006 | 0.122 | 0.949 | 0.371 | 0.759 | 0.606 | 0.019 | 0.941 | 0.400 | 0.000 |

r – coeficiente de correlação; p-valor – probabilidade de aceitar  $H_0$  ( $r = 0$ ).

Tabela 2: Matriz de correlação para altitude, atributos de textura e CE (linhas), com atributos químicos do solo (colunas).

|                             |         | <b>pH</b> | <b>P</b> | <b>K</b> | <b>Ca</b> | <b>Mg</b> | <b>H+Al</b> | <b>SB</b> | <b>t</b> | <b>T</b> | <b>V</b> | <b>MO</b> | <b>P-rem</b> | <b>Zn</b> | <b>Cu</b> | <b>Fe</b> | <b>Mn</b> | <b>B</b> | <b>S</b> |
|-----------------------------|---------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-------------|-----------|----------|----------|----------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| <b>Altitude</b>             | r       | -0.03     | 0.08     | -0.32    | 0.04      | -0.07     | -0.04       | 0.00      | 0.00     | -0.04    | -0.01    | -0.09     | 0.40         | -0.11     | -0.41     | 0.32      | -0.19     | -0.34    | 0.07     |
|                             | p-valor | 0.730     | 0.371    | 0.000    | 0.611     | 0.435     | 0.673       | 0.984     | 0.984    | 0.648    | 0.883    | 0.300     | 0.000        | 0.180     | 0.000     | 0.000     | 0.023     | 0.000    | 0.387    |
| <b>Argila</b>               | r       | -0.11     | -0.15    | 0.13     | -0.07     | 0.19      | 0.28        | 0.00      | 0.00     | 0.29     | -0.29    | 0.26      | -0.42        | 0.04      | 0.30      | -0.04     | 0.21      | 0.10     | -0.07    |
|                             | p-valor | 0.177     | 0.076    | 0.115    | 0.420     | 0.021     | 0.001       | 0.981     | 0.981    | 0.000    | 0.000    | 0.001     | 0.000        | 0.619     | 0.000     | 0.603     | 0.014     | 0.250    | 0.383    |
| <b>Silte</b>                | r       | 0.04      | -0.11    | 0.12     | 0.13      | 0.23      | -0.04       | 0.17      | 0.17     | 0.06     | 0.09     | 0.22      | -0.12        | 0.03      | 0.01      | -0.05     | 0.30      | 0.06     | -0.09    |
|                             | p-valor | 0.662     | 0.197    | 0.155    | 0.112     | 0.006     | 0.602       | 0.037     | 0.037    | 0.459    | 0.308    | 0.007     | 0.149        | 0.731     | 0.935     | 0.554     | 0.000     | 0.491    | 0.288    |
| <b>Areia</b>                | r       | 0.06      | 0.18     | -0.18    | -0.04     | -0.30     | -0.18       | -0.12     | -0.12    | -0.26    | 0.16     | -0.35     | 0.40         | -0.05     | -0.23     | 0.07      | -0.36     | -0.11    | 0.11     |
|                             | p-valor | 0.489     | 0.028    | 0.032    | 0.630     | 0.000     | 0.033       | 0.161     | 0.161    | 0.002    | 0.060    | 0.000     | 0.000        | 0.546     | 0.006     | 0.431     | 0.000     | 0.182    | 0.174    |
| <b>CEa<br/>(11/11/2010)</b> | r       | 0.29      | -0.05    | -0.03    | 0.46      | 0.49      | -0.14       | 0.50      | 0.50     | 0.16     | 0.21     | 0.20      | -0.22        | 0.23      | -0.09     | -0.19     | 0.05      | 0.12     | -0.10    |
|                             | p-valor | 0.001     | 0.520    | 0.708    | 0.000     | 0.000     | 0.093       | 0.000     | 0.000    | 0.053    | 0.011    | 0.015     | 0.007        | 0.007     | 0.265     | 0.026     | 0.521     | 0.160    | 0.224    |
| <b>CEa<br/>(23/11/2010)</b> | r       | 0.53      | -0.06    | -0.08    | 0.44      | 0.43      | -0.45       | 0.47      | 0.47     | -0.19    | 0.52     | 0.04      | -0.32        | 0.23      | 0.05      | -0.39     | 0.17      | 0.11     | -0.17    |
|                             | p-valor | 0.000     | 0.506    | 0.318    | 0.000     | 0.000     | 0.000       | 0.000     | 0.000    | 0.024    | 0.000    | 0.627     | 0.000        | 0.006     | 0.537     | 0.000     | 0.048     | 0.178    | 0.043    |
| <b>CEa<br/>(04/12/2010)</b> | r       | 0.39      | -0.19    | 0.03     | 0.35      | 0.42      | -0.32       | 0.40      | 0.40     | -0.09    | 0.34     | 0.08      | -0.38        | 0.13      | 0.06      | -0.16     | 0.22      | 0.11     | -0.13    |
|                             | p-valor | 0.000     | 0.026    | 0.724    | 0.000     | 0.000     | 0.000       | 0.000     | 0.000    | 0.268    | 0.000    | 0.322     | 0.000        | 0.137     | 0.479     | 0.049     | 0.010     | 0.188    | 0.132    |
| <b>CEa<br/>(13/12/2010)</b> | r       | 0.41      | -0.15    | 0.02     | 0.39      | 0.53      | -0.30       | 0.46      | 0.46     | -0.03    | 0.37     | 0.15      | -0.34        | 0.24      | 0.00      | -0.17     | 0.21      | 0.10     | -0.14    |
|                             | p-valor | 0.000     | 0.076    | 0.834    | 0.000     | 0.000     | 0.000       | 0.000     | 0.000    | 0.721    | 0.000    | 0.077     | 0.000        | 0.004     | 0.993     | 0.039     | 0.011     | 0.213    | 0.101    |
| <b>CEa<br/>(26/01/2011)</b> | r       | 0.45      | -0.09    | 0.07     | 0.44      | 0.50      | -0.35       | 0.49      | 0.49     | -0.07    | 0.41     | 0.11      | -0.35        | 0.27      | 0.02      | -0.22     | 0.13      | 0.16     | -0.11    |
|                             | p-valor | 0.000     | 0.303    | 0.420    | 0.000     | 0.000     | 0.000       | 0.000     | 0.000    | 0.413    | 0.000    | 0.193     | 0.000        | 0.001     | 0.793     | 0.008     | 0.135     | 0.060    | 0.188    |
| <b>CEes</b>                 | r       | 0.19      | 0.08     | 0.09     | 0.27      | 0.18      | -0.24       | 0.27      | 0.27     | -0.08    | 0.29     | 0.07      | -0.16        | 0.13      | 0.06      | -0.26     | -0.06     | 0.17     | -0.05    |
|                             | p-valor | 0.025     | 0.329    | 0.308    | 0.001     | 0.031     | 0.004       | 0.001     | 0.001    | 0.323    | 0.000    | 0.390     | 0.062        | 0.128     | 0.500     | 0.002     | 0.452     | 0.045    | 0.571    |

r – coeficiente de correlação; p-valor – probabilidade de aceitar  $H_0$  ( $r = 0$ ).

Tabela 3: Matriz de correlação para altitude, atributos de textura do solo, e CE.

|                             |         | Altitude | Argila | Silte | Areia | CEa<br>(11/11/2010) | CEa<br>(23/11/2010) | CEa<br>(04/12/2010) | CEa<br>(13/12/2010) | CEa<br>(26/01/2011) | CEes  |
|-----------------------------|---------|----------|--------|-------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------|
| <b>Altitude</b>             | r       | 1.00     |        |       |       |                     |                     |                     |                     |                     |       |
|                             | p-valor | 0.000    |        |       |       |                     |                     |                     |                     |                     |       |
| <b>Argila</b>               | r       | -0.13    | 1.00   |       |       |                     |                     |                     |                     |                     |       |
|                             | p-valor | 0.125    | 0.000  |       |       |                     |                     |                     |                     |                     |       |
| <b>Silte</b>                | r       | -0.16    | -0.01  | 1.00  |       |                     |                     |                     |                     |                     |       |
|                             | p-valor | 0.055    | 0.909  | 0.000 |       |                     |                     |                     |                     |                     |       |
| <b>Areia</b>                | r       | 0.21     | -0.74  | -0.67 | 1.00  |                     |                     |                     |                     |                     |       |
|                             | p-valor | 0.014    | 0.000  | 0.000 | 0.000 |                     |                     |                     |                     |                     |       |
| <b>CEa<br/>(11/11/2010)</b> | r       | 0.30     | 0.18   | 0.11  | -0.21 | 1.00                |                     |                     |                     |                     |       |
|                             | p-valor | 0.000    | 0.033  | 0.172 | 0.012 | 0.000               |                     |                     |                     |                     |       |
| <b>CEa<br/>(23/11/2010)</b> | r       | -0.18    | 0.17   | 0.27  | -0.30 | 0.49                | 1.00                |                     |                     |                     |       |
|                             | p-valor | 0.032    | 0.046  | 0.001 | 0.000 | 0.000               | 0.000               |                     |                     |                     |       |
| <b>CEa<br/>(04/12/2010)</b> | r       | -0.07    | 0.25   | 0.19  | -0.32 | 0.52                | 0.65                | 1.00                |                     |                     |       |
|                             | p-valor | 0.440    | 0.003  | 0.020 | 0.000 | 0.000               | 0.000               | 0.000               |                     |                     |       |
| <b>CEa<br/>(13/12/2010)</b> | r       | -0.02    | 0.24   | 0.24  | -0.34 | 0.52                | 0.69                | 0.77                | 1.00                |                     |       |
|                             | p-valor | 0.811    | 0.003  | 0.004 | 0.000 | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               |                     |       |
| <b>CEa<br/>(26/01/2011)</b> | r       | -0.03    | 0.26   | 0.21  | -0.34 | 0.53                | 0.63                | 0.70                | 0.78                | 1.00                |       |
|                             | p-valor | 0.682    | 0.002  | 0.011 | 0.000 | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               |       |
| <b>CEes</b>                 | r       | -0.39    | -0.14  | 0.34  | -0.13 | -0.14               | 0.29                | 0.04                | 0.08                | 0.11                | 1.00  |
|                             | p-valor | 0.000    | 0.091  | 0.000 | 0.131 | 0.093               | 0.001               | 0.598               | 0.326               | 0.210               | 0.000 |

r – coeficiente de correlação; p-valor – probabilidade de aceitar  $H_0$  ( $r = 0$ ).

## APÊNDICE B

### Aferição do aparelho (LandMapper ERM02)

O aparelho utilizado para as medições de campo foi LandMapper® ERM 02 fabricado pela empresa Landviser<sup>©</sup>. Esse aparelho utiliza o princípio da resistividade elétrica (RE), que é medida por meio do contato de quatro eletrodos com o solo. A resistividade elétrica de um material pode ser definida pela equação 1:

$$RE = \frac{A\Delta\varphi}{LI} \quad (1)$$

Em que:

$ER$  = Resistividade elétrica (Ohm m);

$A$  = Área da sessão transversal;

$\Delta\varphi$  = Diferença de potencial elétrico;

$L$  = Comprimento do condutor;

$I$  = Intensidade da corrente elétrica.

A razão entre a área da sessão transversal e o comprimento do condutor é chamada de coeficiente geométrico  $K$ . O  $K$  pode ser calculado para cada configuração dos eletrodos em campo, ou calibrado com solução teste quando utilizada células de medição em laboratório. Assim, a resistividade elétrica é obtida por:

$$RE = K \frac{\Delta\varphi}{I} \quad (2)$$

A condutividade elétrica  $CE$  equivale ao inverso da resistividade elétrica.

$$CE = \frac{1}{RE} \quad (3)$$

A configuração dos eletrodos utilizada foi a Matriz de Wenner (Figura 1). Nessa configuração os eletrodos são distribuídos em linha reta e igualmente espaçados. Utilizando a matriz de Wenner, a profundidade a qual se refere à medida equivale à distância entre os eletrodos. Dessa forma, para que as medidas representem a camada de 0 a 0,20 m do perfil do solo, os eletrodos devem estar igualmente espaçados a 0,20 m.

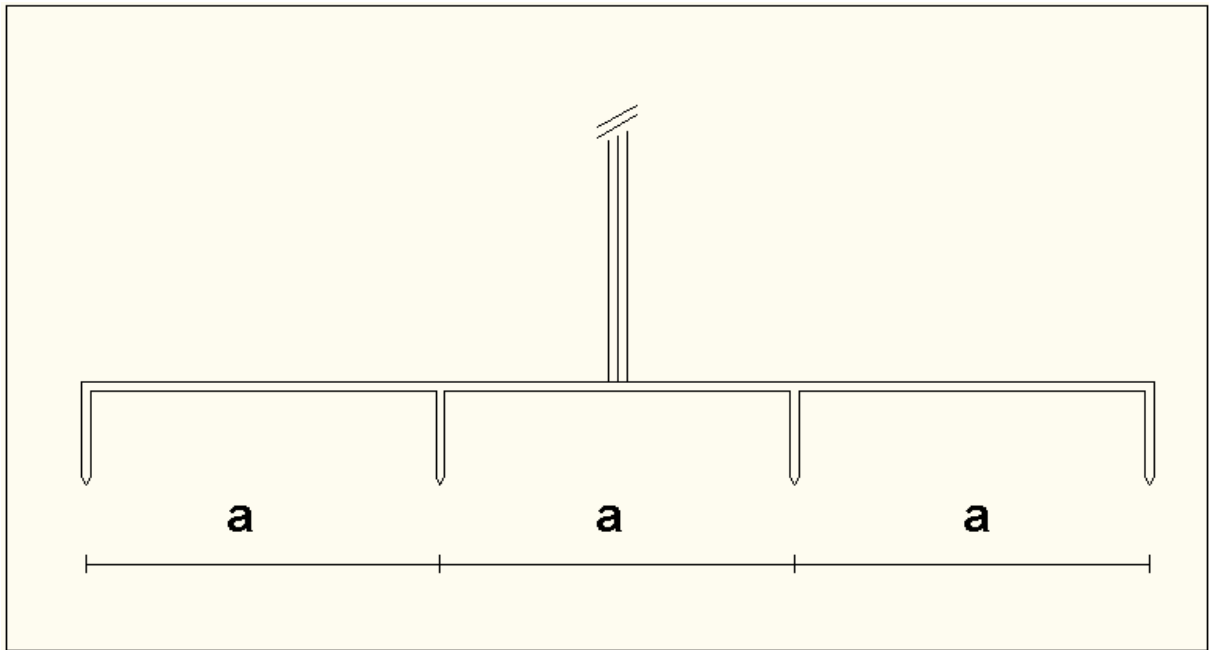


Figura 1: Esquema ilustrando a configuração da matriz de Wenner, em que “a” equivale à distância entre os eletrodos.

O valor de  $K$  é obtido pela equação 4, quando se utiliza a matriz de Wenner como configuração dos eletrodos. Para que a CEa represente a camada de 0 a 0,20 m, o coeficiente geométrico calculado equivale a 1,26.

$$K = 2\pi a \quad (4)$$

Em que:

$K$  = Coeficiente geométrico;

$a$  = Distância entre os eletrodos em metro.

O aparelho LandMapper® ERM 02 foi comparado com um condutivímetro de laboratório da marca Tecnal®, modelo Tec-4MP (Figura 2). Para tanto, 10 das 150 amostras de solo coletadas na área experimental, foram avaliadas. As soluções foram preparadas para o extrato de saturação na proporção 1:5 solo/água. A leitura da CE foi realizada em ambos os aparelhos.



Figura 2: (a)-Condutivímetro de laboratório e (b)-Condutivímetro portátil LanMapper ERM02.

O coeficiente geométrico da célula foi obtido utilizando uma solução padrão com condutividade elétrica conhecida (Tabela 1).

Tabela 1: Obtenção do coeficiente geométrico da célula de medição.

|                    | $\mu\text{S/cm}$ | $\mu\text{S/m}$ | $\text{mS/m}$ | $\text{Ohm m}$ |
|--------------------|------------------|-----------------|---------------|----------------|
| Solução padrão     | 146.7            | 14670           | 14.67         | 68.17          |
| Leitura LandMapper |                  |                 |               | 2150           |
| K                  |                  |                 |               | 0.032          |

Como os aparelhos trabalham com unidades diferentes, algumas conversões de unidade foram necessárias. Na tabela 2 são apresentados os valores de RE para os dois aparelhos.

Tabela 2: Resistividade elétrica medida com o condutivímetro de laboratório e com o LandMapper ERM 02.

| Id - amostras | Condutivímetro                  |                | Land Mapper                   |  |
|---------------|---------------------------------|----------------|-------------------------------|--|
|               | Leitura<br>( $\mu\text{S/cm}$ ) | $\text{Ohm m}$ | Leitura<br>( $\Delta\phi/I$ ) | $k^* \Delta\phi/I$<br>( $\text{Ohm m}$ ) |
| 1             | 99,1                            | 100,9          | 3320,0                        | 105,3                                    |
| 2             | 97,9                            | 102,1          | 3071,0                        | 97,4                                     |
| 3             | 89,7                            | 111,4          | 3389,0                        | 107,4                                    |
| 4             | 89,2                            | 112,2          | 3652,0                        | 115,8                                    |
| 5             | 78,5                            | 127,3          | 3831,0                        | 121,5                                    |
| 6             | 72,9                            | 137,2          | 3953,0                        | 125,3                                    |
| 7             | 68,2                            | 146,6          | 4499,0                        | 142,6                                    |
| 8             | 64,4                            | 155,3          | 4777,0                        | 151,5                                    |
| 9             | 62,9                            | 159,0          | 4801,0                        | 152,2                                    |
| 10            | 55,3                            | 180,8          | 5151,0                        | 163,3                                    |

O coeficiente de correlação entre as medidas de RE dos aparelhos foi  $r = 0,9810$  e a probabilidade desse valor ser igual a zero foi  $p\text{-valor} < 0,001$ . A raiz do erro de médio quadrático (RMSE) foi 7,9 e o erro médio quadrático normalizado (NMSE) foi 0,003. A figura 3 apresenta o gráfico de dispersão entre a RE medida em ambos os aparelhos

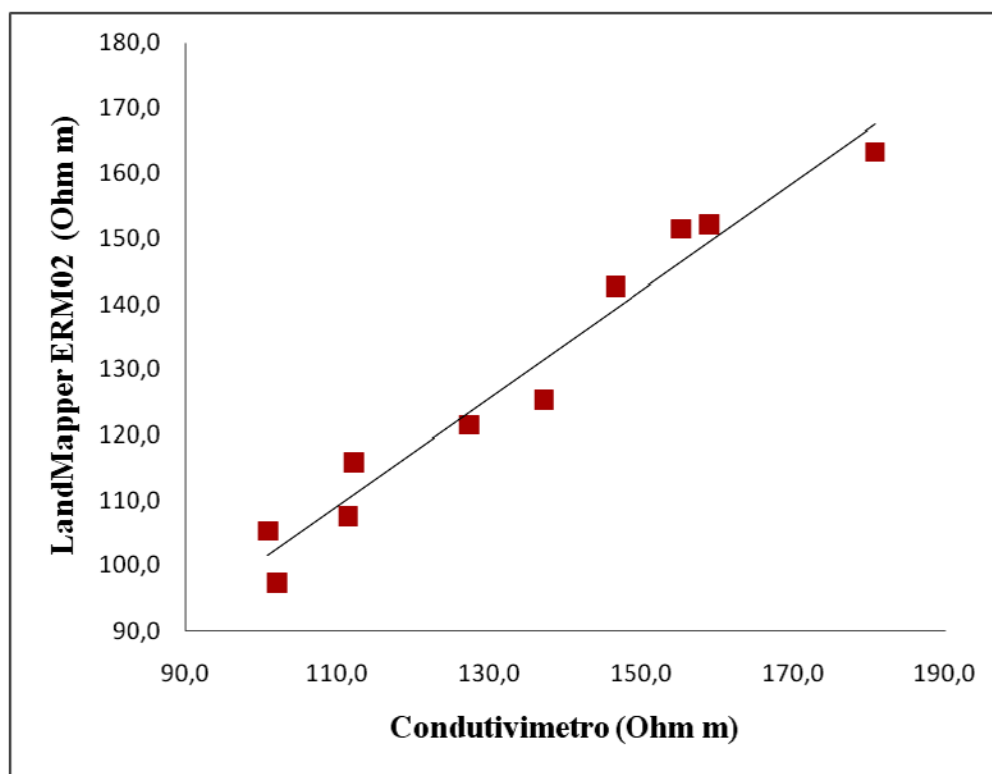


Figura 3: Gráfico de dispersão entre os valores de CE medidos com o condutivímetro de laboratório e o LandMapper ERM02.

## CONCLUSÃO

O aparelho LandMapper ERM02, comparado com um condutivímetro de laboratório, apresentou uma elevada correlação entre suas medidas, e um reduzido NMSE e RMSE. Além disso, deve-se considerar que ambos os aparelhos apresentam precisão de até 1% em suas escalas de medição, segundo seus fabricantes.

**Referência utilizada:** Manual do usuário LandMapper ERM02, fornecido por **Landviser, LLC and ASTRO Group, LLC**.