

Correlação entre condutividade elétrica aparente e atributos químicos e físicos de um Latossolo

Eduardo Leonel Bottega^{1*}, Daniel Marçal de Queiroz², Nerilson Terra Santos²,
Francisco de Assis de Carvalho Pinto², Cristiano Márcio Alves de Souza³

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Curitiba, SC, Brasil

²Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil

³Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, Brasil

*Autor correspondente: e-mail: bottega.elb@gmail.com

Resumo

A agricultura de precisão vem sendo utilizada como importante técnica de manejo localizado da fertilidade do solo. Para tanto, é indispensável à caracterização da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo através de amostragem capaz de representar tais variações. O presente estudo teve por objetivo analisar a correlação entre a condutividade elétrica aparente com os atributos químicos e físicos de um Latossolo Vermelho distroférico. O trabalho foi realizado em uma propriedade localizada no cerrado brasileiro. Em uma área de 90 hectares foram coletados 181 amostras de solo georeferenciadas, na profundidade de 0,00 – 0,20 metros. Nos mesmos locais de retirada de amostras foram efetuadas leituras de condutividade elétrica aparente do solo. As amostras foram encaminhadas ao laboratório para realização das análises física e química. Selecionou-se, aleatoriamente, 30 pontos amostrais e calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis físicas, químicas e a condutividade elétrica aparente do solo. Não foi observado correlação significativa entre a condutividade elétrica aparente com os atributos físicos do solo. Observou-se correlação positiva e significativa da condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0,20 m com os atributos químicos fósforo, fósforo remanescente e zinco.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; cerrado; sensores; zonas de manejo.

Correlation between apparent electrical conductivity and chemical and physical attributes of a Rhodic Hapludox

Abstract

Precision agriculture has been used as an important technique for localized management of soil fertility. Therefore, it is essential to characterize the spatial variability of chemical and physical attributes of the soil by sampling can represent such variations. This study aimed to analyze the correlation between the apparent electrical conductivity with the chemical and physical attributes of an Rhodic Hapludox. The work was performed on a property located in the Brazilian Cerrado. In an area of 90 hectare were collected 181 georeferenced soil samples at depths from 0.00 to 0.20 meters. The same sites and removal of samples were made apparent electrical conductivity of the soil. The samples were sent to the laboratory to perform the physical and chemical analysis. Were selected randomly sampling 30 points and calculated the Pearson correlation coefficient between the variable physical, chemical and apparent soil electrical conductivity. There was no significant correlation between the apparent electrical conductivity with the soil physical attributes. There was a significant positive correlation of apparent electrical conductivity of the soil at a depth of 0.20 m with the chemical attributes match, remaining phosphorus and zinc.

Keywords: Precision agriculture; Brazilian savannah; sensors; management zones.

Introdução

A agricultura de precisão vem sendo utilizada como importante técnica de manejo localizado da fertilidade do solo. Para tanto, é indispensável à caracterização da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo através de amostragem capaz de representar tais variações. Neste contexto, a utilização de variáveis de aquisição rápida, fácil e de baixo custo, a fim de caracterizar a variabilidade existente em um campo de produção, torna-se um fator chave.

O estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo é particularmente importante no manejo localizado para aplicação de fertilizantes agrícolas (Sanchez et al. 2009; Rosa Filho et al. 2009). A variabilidade espacial dos solos é resultado de processos pedogenéticos e pode ser demonstrada por resultados dos levantamentos e análises, bem como pelas diferenças encontradas nas produções das plantas (Silva et al. 2010). Lima et al. (2010) estudando a variabilidade espacial de atributos do solo e do crescimento de plantas de *Eucalyptus camaldulensis*, concluíram que as correlações lineares simples, entre o volume de madeira e os atributos do solo, embora baixas, foram significativas quando pareadas com a resistência mecânica à penetração e o pH. Dessa forma, o estudo da variabilidade espacial, com a finalidade de sensoriamento da área, torna-se parte essencial da agricultura de precisão.

A caracterização da variabilidade espacial de atributos do solo no campo pode ser realizada por meio de amostragem e análise de solo, este processo além de exigir muito tempo, é de custo elevado. A medição e a caracterização da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo tem se mostrado uma importante ferramenta, pois se trata de um processo relativamente fácil, rápido e confiável (Corwin & Lesch, 2003). Alguns pesquisadores (Corwin & Lesch, 2005a; Corwin & Lesch, 2005b; Lesch et al. 2005; Corwin et al. 2006; Yan et al. 2007a; Yan et al. 2007b; Yan et al. 2007c; Yan et al. 2008; Saey et al. 2009; Morari et al. 2009) demonstraram a importância desempenhada pelas variáveis elétricas para

explicar a variabilidade da produtividade agrícola e das propriedades físico-químicas do solo.

Machado et al. (2006) realizaram estudos utilizando o mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo e observaram que o mapa produzido refletiu a variação nos teores de argila, podendo ser utilizado para a delimitação das zonas de manejo, por exemplo, para aplicação de fertilizantes a taxas variáveis. Neste contexto, para aplicação de técnicas de agricultura de precisão, é indispensável o conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo. Conhecendo-se o comportamento das variáveis espacialmente é possível de se planejar de forma eficiente as intervenções a serem realizadas em um campo de produção. O presente estudo objetivou investigar a correlação da condutividade elétrica aparente do solo com atributos químicos e físicos de um Latossolo Vermelho distroférico, cultivado em sistema de rotação de culturas utilizando plantio direto.

Material e Métodos

A coleta de dados foi realizada em uma fazenda localizada no município de Sidrolândia, Mato Grosso do Sul, zona UTM 21 Sul, com coordenadas 702879,040 m Leste e 7673084,461 m Norte, no datum SIRGAS 2000. A altitude média é de 490 metros. O relevo é considerado levemente ondulado. O solo predominante é classificado como Latossolo Vermelho distroférico (Embrapa, 2006). Na fazenda cultiva-se soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays*) e algodão (*Gossypium hirsutum* L.), em sistema de rotação de culturas, utilizando sistema de plantio direto. O trabalho foi conduzido em uma área de aproximadamente 90 hectares.

Para amostragem dos atributos físicos, químicos e da condutividade elétrica do solo, foi utilizada uma grade com densidade de dois pontos por hectare, totalizando 181 pontos amostrais, conforme apresentado na Figura 1. A utilização da grade amostral de 2 pontos por hectare teve por objetivo a detecção da variabilidade, uma vez que empresas prestadoras de serviços em agricultura de precisão para regiões do Cerrado têm utilizado

malhas amostrais com um ponto a cada 5 ou 10 ha, que podem não estar representando a variabilidade espacial dos atributos analisados (Resende et al. 2006).

Os pontos amostrais foram georeferenciados utilizando-se um aparelho receptor GPS Topográfico, Marca Magellan, Modelo Promark 3, com correção diferencial pós-processada. Para correção diferencial foram utilizados os dados da base da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) do IBGE, localizada no município de Campo

Grande/MS, o datum utilizado foi o SIRGAS 2000, a correção foi realizada utilizando o programa computacional GNSS Solutions® fornecido pelo fabricante do aparelho GPS.

Para a determinação da condutividade elétrica aparente do solo utilizou-se o método da resistividade elétrica. A condutividade elétrica foi obtida introduzindo na superfície do solo quatro eletrodos igualmente espaçados. Nos eletrodos externos foi aplicada uma corrente elétrica e a diferença de potencial foi medida nos eletrodos internos, conforme apresentado na Figura 2.

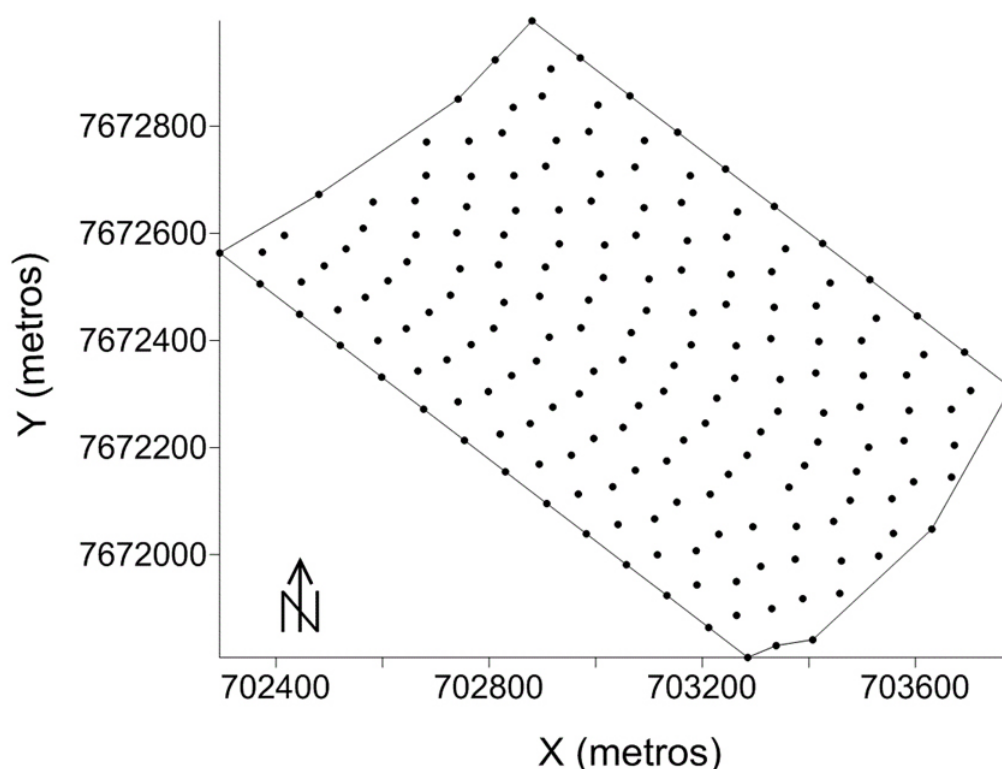


Figura 1. Grade amostral utilizada na coleta dos dados.

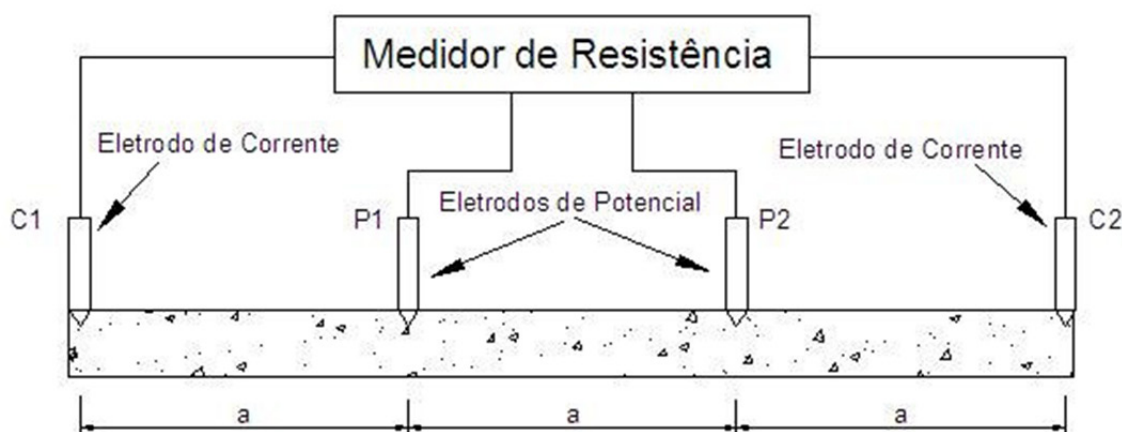


Figura 2. Diagrama esquemático do método da resistividade elétrica com quatro eletrodos: dois eletrodos de corrente (C1 e C2) e dois eletrodos potenciais (P1 e P2) (Corwin & Lesh, 2003).

Essa configuração é denominada *Matriz de Wenner* (Corwin & Hedrickx, 2002; Corwin & Lesh, 2003). A resistividade obtida utilizando a *Matriz de Wenner* foi calculada pela Equação 1:

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot \Delta V}{i} \quad (1)$$

Em que,

ρ é resistividade, Ohm.m;

a é o espaçamento entre eletrodos, m;

ΔV é a diferença de potencial medida, V;

i é a corrente elétrica aplicada, A.

A condutividade elétrica aparente do solo é o inverso da resistividade, sendo calculada pela Equação 2.

$$CE_a = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

Em que,

CE_a é a condutividade elétrica aparente do solo, S.m⁻¹.

Para obtenção da condutividade elétrica aparente do solo utilizou-se um medidor de condutividade elétrica portátil, marca Landviser®, modelo LandMapper® ERM-02. Os quatro eletrodos foram arranjados de forma a obter medições no perfil de 0,20 m de profundidade. Para cada ponto amostrado, retirou-se uma amostra de solo composta por outras quatro amostras simples, representativas na faixa de 0,00 – 0,20 m de profundidade. As amostras simples foram coletadas em um raio de 3 m do ponto georeferenciado. As quatro amostras simples foram homogeneizadas para retirada de, aproximadamente, 300 g de solo, que foi colocado em embalagem plástica identificada.

As amostras de solo foram enviadas ao Laboratório de Análise de Solos para a determinação da composição textural (Argila, Silte, Areia Grossa e Areia Fina); condutividade elétrica do extrato de saturação (1:5); e análise química do solo (pH, acidez potencial, teores de Ca, Mg, K, P, Al, P-rem, matéria orgânica, soma de bases, a capacidade de troca catiônica e a saturação por bases, índice de saturação de alumínio, Zn, Fe, Mn e Cu).

Os dados dos atributos físicos e químicos

do solo foram submetidos à análise exploratória para verificar a presença de valores discrepantes. Nesta análise o limite crítico para valores discrepantes é definido a partir da amplitude interquartil (DQ) calculada pela diferença entre o quartil superior e o quartil inferior. O limite superior foi definido por (Q3 + 1,5 x DQ) e o limite inferior por (Q1 - 1,5 x DQ), em que Q1 e Q3 são o primeiro e o terceiro quartil, respectivamente.

Em seguida, os dados foram analisados por meio de estatística descritiva, calculando-se a média, mediana, valor mínimo, valor máximo, coeficiente de variação, quartil inferior, quartil superior, desvio padrão, coeficiente de assimetria e de curtose, buscando assim caracterizar a distribuição dos dados. A normalidade foi testada pelo teste Shapiro-Wilk's (p<0,05).

Utilizando-se os valores de condutividade elétrica aparente do solo, observados na faixa de profundidade de 0,00 – 0,20 m e os valores dos atributos do solo analisados determinaram-se os coeficientes de correlação de Pearson entre estas variáveis. Para determinação da correlação, selecionou-se aleatoriamente 30 pontos dos 181 amostrados. Montgomery & Runger (2009) destacam que o número de pontos utilizados na análise de correlação influencia de forma tendenciosa o teste de hipótese, sendo que, quanto maior o número de pontos, maior a chance de rejeição da hipótese de nulidade. Isto é mais evidente para o teste F. Para graus de liberdade do tratamento e graus de liberdade do resíduo tendendo a infinito, o valor tabelado é um, ou seja, qualquer diferença entre médias é significativa. Na Figura 3 é apresentado o mapa de distribuição dos 30 pontos utilizados na análise correlação. Para realização das análises de correlação e da estatística clássica utilizou-se o programa computacional Statistica, versão 7.0.

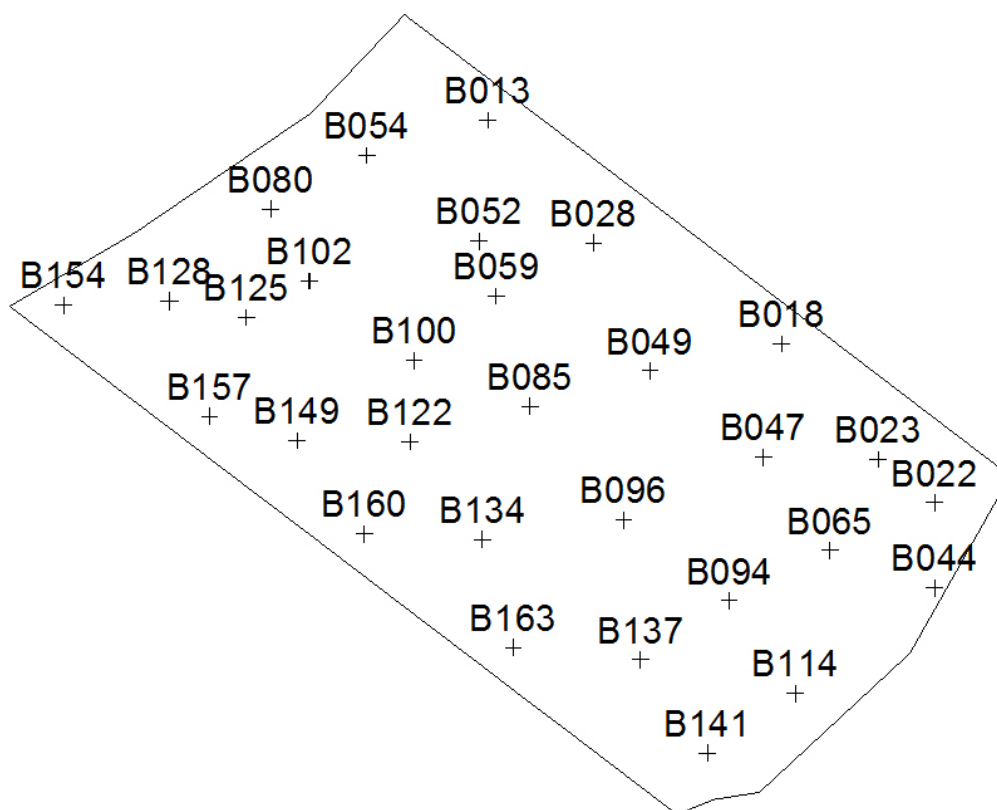


Figura 3. Distribuição espacial dos 30 pontos amostrais utilizados na análise de correlação de Pearson.

Resultados e Discussão

Na análise exploratória dos dados, observou-se que todas as variáveis se apresentaram valores discrepantes, porém não chegaram a 5% do total dos dados. Esses valores influenciaram as medidas de dispersão e posição, sendo removidos da base de dados após análise visual e de localização espacial. Na Tabela 1 são apresentados os valores de estatística descritiva e distribuição de frequência dos atributos de solo. Aproximadamente 50% das variáveis analisadas, apresentam distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk's a 5% de probabilidade.

Apresentaram distribuição leptocúrtica (curva de distribuição alongada) as variáveis areia grossa, alumínio e saturação por alumínio. As demais variáveis tenderam a distribuição mesocúrtica (nem alongada, nem achatada). Observou-se também que, com exceção das variáveis fósforo, potássio, ferro e manganês, todas as variáveis estudadas apresentaram valores de média e mediana semelhantes, indicando que os dados tendem a uma distribuição simétrica.

Foram obtidos coeficientes de variação (CV%) entre 3,7 a 143,1%. De acordo com a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980), os valores de CV% para argila, acidez ativa em água, capacidade de troca de cátions a pH 7 e matéria orgânica foram classificados como baixos (CV% < 12%). Altos valores de CV% (CV% > 60%) foram obtidos para as variáveis: fósforo, alumínio e saturação por alumínio. As demais variáveis apresentaram médios valores de CV% (12% < CV < 60%).

Os valores médios da análise de solo para os atributos químicos apresentados na Tabela 1 foram classificados, segundo Embrapa (2008) para região central do Brasil, em altos para cálcio, magnésio, fósforo, potássio, fósforo remanescente, acidez potencial, matéria orgânica, zinco, ferro, manganês e cobre; médios para soma de bases, capacidade efetiva de troca de cátions, capacidade de troca de cátions a pH 7, saturação por bases e acidez ativa em água e baixos para alumínio e saturação por alumínio. Com base nesta classificação, pode-se constatar que a área apresenta boa condição de fertilidade.

Tabela 1. Estatística descritiva e distribuição de frequência dos atributos do solo

| Variáveis | Média | Mediana | Mín. | Máx. | Cv ⁽²²⁾ | Q1 ⁽²³⁾ | QS ⁽²⁴⁾ | s ⁽²⁵⁾ | Cs ⁽²⁶⁾ | Ck ⁽²⁷⁾ | w |
|----------------------------------|-------|---------|------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----|
| Altitude (m) | 6,6 | 7,1 | 1,0 | 9,9 | 35,4 | 5,2 | 8,6 | 2,4 | -0,63 | -0,59 | * |
| CEa20 ⁽¹⁾ | 2,4 | 2,0 | 1,0 | 5,0 | 34,0 | 2,0 | 3,0 | 0,8 | 1,45 | 2,18 | * |
| Areia Grossa ⁽²⁾ | 10,2 | 10,0 | 7,0 | 13,0 | 14,1 | 9,0 | 11,0 | 1,4 | 0,02 | -0,80 | * |
| Areia Fina ⁽²⁾ | 23,8 | 24,0 | 16,0 | 32,0 | 15,8 | 21,0 | 27,0 | 3,8 | -0,09 | -0,58 | * |
| Silte ⁽²⁾ | 63,5 | 64,0 | 56,0 | 70,0 | 4,3 | 62,0 | 65,0 | 2,7 | -0,35 | 0,26 | * |
| Argila ⁽²⁾ | 8,6 | 8,6 | 5,0 | 12,6 | 14,9 | 7,7 | 9,5 | 1,3 | 0,13 | 0,02 | ns |
| CEe 1:5 ⁽³⁾ | 5,5 | 5,5 | 4,9 | 6,1 | 3,7 | 5,4 | 5,6 | 0,2 | 0,01 | 0,36 | ns |
| pH ⁽⁴⁾ | 24,4 | 19,2 | 5,2 | 70,9 | 62,9 | 14,4 | 29,7 | 15,3 | 1,32 | 0,88 | * |
| P ⁽⁵⁾ | 200,6 | 194,0 | 71,0 | 354,0 | 27,2 | 168 | 220,0 | 54,6 | 0,60 | 0,56 | * |
| K ⁽⁶⁾ | 3,6 | 3,6 | 2,3 | 5,5 | 15,4 | 3,3 | 3,9 | 0,6 | 0,21 | 0,33 | ns |
| Ca ²⁺ ⁽⁷⁾ | 0,9 | 0,9 | 0,5 | 1,4 | 22,0 | 0,8 | 1,1 | 0,2 | 0,12 | -0,60 | ns |
| Mg ²⁺ ⁽⁸⁾ | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 135 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 1,49 | 2,35 | * |
| Al ³⁺ ⁽⁹⁾ | 6,1 | 6,0 | 3,8 | 8,5 | 14,8 | 5,5 | 6,7 | 0,9 | 0,19 | 0,06 | ns |
| H+Al ⁽¹⁰⁾ | 5,1 | 5,0 | 3,2 | 7,2 | 14,9 | 4,6 | 5,6 | 0,7 | 0,14 | 0,04 | ns |
| SB ⁽¹¹⁾ | 5,1 | 5,1 | 3,4 | 7,2 | 13,7 | 4,7 | 5,6 | 0,7 | 0,22 | 0,11 | ns |
| t ⁽¹²⁾ | 11,2 | 11,2 | 8,9 | 13,2 | 7,3 | 10,6 | 11,7 | 0,8 | -0,04 | -0,40 | ns |
| T ⁽¹³⁾ | 45,3 | 45,4 | 28,1 | 65,0 | 14,2 | 41,3 | 49,2 | 6,4 | 0,02 | 0,31 | ns |
| V ^(%) ⁽¹⁴⁾ | 1,3 | 0,0 | 0,0 | 8,6 | 143 | 0,0 | 2,1 | 1,8 | 1,84 | 3,62 | * |
| m ^(%) ⁽¹⁵⁾ | 3,8 | 3,8 | 3,1 | 4,4 | 6,9 | 3,6 | 3,9 | 0,3 | -0,08 | -0,27 | * |
| MO ⁽¹⁶⁾ | 20,1 | 20,5 | 13,3 | 26,3 | 13,4 | 18,3 | 22,0 | 2,7 | -0,24 | -0,48 | ns |
| P-rem ⁽¹⁷⁾ | 3,8 | 3,4 | 1,0 | 8,9 | 42,9 | 2,7 | 4,8 | 1,6 | 0,95 | 0,43 | * |
| Zn ⁽¹⁸⁾ | 23,6 | 22,8 | 12,7 | 39,5 | 24,8 | 19,0 | 27,8 | 5,8 | 0,50 | -0,56 | * |
| Fe ⁽¹⁹⁾ | 39,8 | 38,3 | 16,6 | 71,2 | 23,9 | 32,8 | 45,9 | 9,5 | 0,41 | 0,12 | ns |
| Mn ⁽²⁰⁾ | 9,0 | 8,9 | 4,8 | 12,6 | 15,8 | 8,0 | 10,1 | 1,4 | 0,09 | -0,17 | ns |
| Cu ⁽²¹⁾ | 6,6 | 7,1 | 1,0 | 9,9 | 35,4 | 5,2 | 8,6 | 2,4 | -0,63 | -0,59 | * |

⁽¹⁾Condutividade elétrica aparente do solo à 0,20 m de profundidade (mS m⁻¹); ⁽²⁾dag Kg⁻¹; ⁽³⁾Condutividade elétrica do extrato de solo com diluição em cinco partes de água destilada; ⁽⁴⁾Acidez ativa em água; ⁽⁵⁾Fósforo (mg dm⁻³); ⁽⁶⁾Potássio (mg dm⁻³); ⁽⁷⁾Cálcio (cmolc dm⁻³); ⁽⁸⁾Magnésio (cmolc dm⁻³); ⁽⁹⁾Alumínio (cmolc dm⁻³); ⁽¹⁰⁾Acidez potencial (cmolc dm⁻³); ⁽¹¹⁾Soma de bases (cmolc dm⁻³); ⁽¹²⁾Capacidade efetiva de troca de cátions (cmolc dm⁻³); ⁽¹³⁾Capacidade de troca cátions a pH 7 (cmolc dm⁻³); ⁽¹⁴⁾Saturação por bases; ⁽¹⁵⁾Saturação por alumínio; ⁽¹⁶⁾Matéria orgânica (dag Kg⁻¹); ⁽¹⁷⁾Fósforo remanescente (mg L⁻¹); ⁽¹⁸⁾Zinco (mg dm⁻³); ⁽¹⁹⁾Ferro (mg dm⁻³); ⁽²⁰⁾Manganês (mg dm⁻³); ⁽²¹⁾Cobre (mg dm⁻³); ⁽²²⁾Coefficiente de variação (%); ⁽²³⁾Quartil inferior; ⁽²⁴⁾Quartil superior; ⁽²⁵⁾Desvio padrão; ⁽²⁶⁾Coefficiente de assimetria; ⁽²⁷⁾Coefficiente de curtose; *distribuição não normal pelo teste de Shapiro-Wilk's a 5% de probabilidade e ns distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk's a 5% de probabilidade.

Os bons resultados observados podem ser explicados pelo sistema de manejo adotado na propriedade, plantio direto com rotação de culturas, associado à aplicação de elevadas doses de fertilizantes, principalmente os fosfatados, devido ao tipo de solo da região. Alguns pesquisadores (Souza & Alves, 2003; Silveira & Stone, 2001) enfatizam que o sistema plantio direto, quando associados à rotação de culturas anuais, altera as propriedades químicas do solo, com aumento dos teores de matéria orgânica, variações no pH do solo, na capacidade de troca catiônica, bem como nas bases trocáveis e no P disponível, além da diminuição do alumínio tóxico, o que melhora as condições do solo.

Os coeficientes de correlação de Pearson entre a condutividade elétrica e os atributos químicos e físicos do solo são apresentados na Tabela 2. Observou-se que a condutividade elétrica aparente do solo se correlacionou positivamente e significativamente, com os atributos químicos

do solo: fósforo e zinco, ao nível de 5% de probabilidade e com fósforo remanescente ao nível de 1% de probabilidade.

Vários autores obtiveram alta correlação entre a condutividade elétrica aparente do solo e o teor de argila (Lesch et al. 2005; Molin & Castro, 2008), contudo, em algumas pesquisas (Morari et al. 2009; Aimrun et al. 2007), incluindo o presente trabalho, esta correlação foi inexistente ou muito baixa. O coeficiente de correlação mais elevado, positivo e significativo entre a condutividade elétrica do solo foi observado para o teor de fósforo remanescente. Uma das possíveis causas desta baixa correlação não significativa com a argila e a correlação positiva e significativa com fósforo remanescente pode estar associada à adsorção de fósforo nos minerais de argila. Solos muito intemperizados, como os solos de cerrado, apresentam argila do tipo oxidica. Os sítios de adsorção destes minerais são predominantemente de cargas positivas, pois, com o aumento do grau de intemperismo, há uma mudança gradual de

características de um solo, no sentido de torná-lo mais eletropositivo.

Tabela 2. Coeficiente de correlação de Pearson entre a condutividade elétrica aparente a 0,20 metros de profundidade e as propriedades físicas e químicas do solo

| Variáveis | r ⁽¹⁾ |
|--|------------------|
| Areia Grossa (dag kg ⁻¹) | -0,34 |
| Areia Fina (dag kg ⁻¹) | -0,25 |
| Silte (dag kg ⁻¹) | 0,27 |
| Argila (dag kg ⁻¹) | -0,10 |
| CEe1:5 ⁽²⁾ (mS.m ⁻¹) | 0,04 |
| pH ⁽³⁾ | -0,03 |
| Fósforo (P) (mg dm ⁻³) | 0,38* |
| Potássio (K) (mg dm ⁻³) | 0,10 |
| Cálcio (Ca ²⁺) (cmolc dm ⁻³) | 0,02 |
| Magnésio (Mg ²⁺) (cmolc dm ⁻³) | 0,18 |
| Alumínio (Al ³⁺) (cmolc dm ⁻³) | -0,20 |
| Acidez Potencial (H+Al) (cmolc dm ⁻³) | -0,03 |
| SB ⁽⁴⁾ (cmolc dm ⁻³) | 0,09 |
| † ⁽⁵⁾ (cmolc dm ⁻³) | 0,07 |
| T ⁽⁶⁾ (cmolc dm ⁻³) | 0,06 |
| V ⁽⁷⁾ (%) | 0,06 |
| m ⁽⁸⁾ (%) | -0,19 |
| Matéria Orgânica (MO) (dag kg ⁻¹) | 0,18 |
| P-rem ⁽⁹⁾ (mg L ⁻¹) | 0,46** |
| Zinco (Zn) (mg dm ⁻³) | 0,37* |
| Ferro (Fe) (mg dm ⁻³) | -0,09 |
| Manganês (Mn) (mg dm ⁻³) | 0,22 |
| Cobre (Cu) (mg dm ⁻³) | 0,09 |

⁽¹⁾coeficiente de correlação de Pearson; ⁽²⁾condutividade elétrica do extrato do solo com diluição em cinco partes de água destilada; ⁽³⁾acidez ativa em água; ⁽⁴⁾Soma de bases; ⁽⁵⁾capacidade efetiva de troca de cátions; ⁽⁶⁾capacidade de troca cátions a pH 7; ⁽⁷⁾ saturação por bases; ⁽⁸⁾ saturação por alumínio; ⁽⁹⁾ fósforo remanescente; *significância ao nível de 5% de probabilidade, **significância ao nível de 1% de probabilidade.

Após um determinado grau de intemperismo, o solo deixa de ser fonte de fósforo e passa a ser dreno, como o caso dos Latossolos de cerrado, podendo adsorver mais de 2 mg cm⁻³ de fósforo, valor equivalente a 4000 kg de fósforo por hectare, incorporado de 0,00 – 0,20 metros de profundidade (Novais et al. 2007). O fósforo em solução apresenta carga negativa (H₂PO₄⁻), ao se aproximar da argila é adsorvido ao mineral, pois este possui carga positiva. A adsorção do fósforo pela argila neutraliza as cargas positivas deste mineral, que no caso de solos muito intemperizados, são predominantes, influenciando assim a contribuição da argila na condutividade elétrica aparente do solo. Conforme apresentado na Tabela 1, os valores médios de fósforo e fósforo remanescente são classificados como elevados para condição de solo de cerrado (Embrapa, 2008), evidenciando um grande aporte de fósforo neste solo,

ocasionando elevada adsorção.

A correlação observada entre a condutividade elétrica aparente do solo com fósforo e zinco, ao nível de 5% de probabilidade e ao fósforo remanescente ao nível de 1% de probabilidade pode ser atribuída à maior influência destes elementos nas medições de condutividade elétrica do solo para a situação na qual foi medida. A contribuição do fósforo remanescente está associada à transmissão de corrente elétrica pela solução do solo, o mesmo ocorre com o zinco. Neste caso, o fator intensidade (I) destes elementos é evidenciado. O fator intensidade refere-se à concentração, ou mais precisamente, a atividade do íon na solução do solo (Novais et al. 2007).

A dinâmica de correlação entre condutividade elétrica aparente do solo com os teores de fósforo e fósforo remanescente pode ser entendida segundo pesquisas realizadas por Novais & Smyth, (1999). Os autores explicam que o fósforo da solução do solo é denominado fator intensidade (I). O suprimento de I à medida que o fósforo é absorvido é mantido pelo fator quantidade (Q), quantitativamente maior que o I. Há, portanto, um equilíbrio entre o fator I e Q, esta interdependência caracteriza o fator capacidade de P, quantitativamente definido pela relação Q/I.

Em solos com maior adsorção de P, como os mais argilosos e, de modo particular, os mais intemperizados, a relação Q/I será maior do que em solos com menor adsorção, como nos arenosos e, se argilosos, menos intemperizados. Portanto, para o mesmo valor de Q + I, um solo argiloso terá menos P em solução (I) e mais P-lável (Q) que um solo arenoso. Por outro lado, para solos com o mesmo valor de I, a disponibilidade de P é maior que naquele com maior fator capacidade (Q). Como discutido anteriormente, os elevados teores de fósforo e fósforo remanescentes observados na área de estudo podem ser decorrentes do sistema de manejo adotado, rotação de culturas por meio de plantio direto associado à aplicação de elevadas doses de fertilizantes fosfatados, utilizadas em função do tipo de solo da propriedade.

Não é possível estimar valores de atributos

do solo sejam eles químicos ou físicos, utilizando medições de condutividade elétrica aparente do solo (CEa), isso porque as medições de CEa são influenciadas por uma série de fatores como, por exemplo, temperatura do solo, teor de água no solo, íons na solução do solo, textura do solo, estrutura do solo, quantidade de matéria orgânica do solo, etc. Contudo, a utilização da condutividade elétrica aparente do solo como parâmetro para definição de zonas de manejo vem sendo muito pesquisada, devido seu baixo custo e rápida obtenção. Dentro de uma mesma área, zonas que apresentam valores de condutividade elétrica aparente semelhante podem, por exemplo, se investigadas como sendo uniformes para determinados fatores, assim como vem se utilizando dados do mapeamento da produtividade de cereais, podendo ocasionar redução na quantidade de amostras de solo necessárias para caracterizar estas áreas e consequentemente, redução com o custo deste procedimento.

No presente estudo não foi possível estudar a variabilidade espacial da CEa pois a mesma não foi detectada, ou por não existir (área muito homogênea) ou porque a grade amostral utilizada não foi capaz de detectar esta variabilidade. O mapeamento da condutividade elétrica do solo demonstra grande potencial de aplicação em agricultura de precisão, isso porque a aquisição desta informação é rápida e de baixo custo, podendo ser utilizada, por exemplo, juntamente com o modelo digital de elevação, na geração de zonas de manejo diferenciado. Estudos referentes à influência dos fatores químicos, físicos e físico-químicos do solo nas leituras de condutividade elétrica aparente (CEa), medida em nível de campo, devem ser realizados de forma mais detalhada, a fim de se entender a contribuição de cada fator na caracterização da variabilidade espacial da CEa, pois se existe correlação entre estes fatores, grande é a probabilidade de representação do padrão de distribuição espacial de cada variável utilizando o mapeamento da condutividade elétrica.

Conclusões

A condutividade elétrica aparente do solo na profundidade de 0,00 – 0,20 metros correlacionou-se positiva e significativamente com os teores de fósforo, fósforo remanescente e zinco.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudo, à Fazenda Recanto pela disponibilização da área e apoio logístico para a realização deste estudo, a Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (DEA-UFV).

Referências

- Aimrun, W., Amin, M.S.M., Ahmad, D., Hanafi, M.M., Chan, C.S. 2007. Spatial variability of bulk soil electrical conductivity in a Malaysian paddy field: key to soil management. *Paddy Water Environ* 5: 113–121.
- Corwin, D.L., Hendrickx, J.M.H. 2002. Electrical Resistivity: Wenner Array. In: Silva, J.S. *Methods of Soil Analysis*. Part 4. Physical Methods, Madison, Wisconsin, USA: SSSA Book Series, n. 5, p.1282–1287.
- Corwin, D.L., Lesch, S.M., Oster, J.D., Kaffka, S.R. 2006. Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma* 131: 369–387.
- Corwin, D.L., Lesch, S.M. 2003. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: Theory, Principles, and Guidelines. *Agronomy Journal* 95: 471–471.
- Corwin, D.L., Lesch, S.M., Shouse, P.J., Soppe, R., Ayars, J.E. 2003. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. *Agronomy Journal* 95: 352–364.
- Corwin, D.L., Lesh, S.M. 2005a. Apparent soil electrical conductivity measurements in agricultural. *Computer and Electronic in Agriculture* 46: 11–43.
- Corwin, D.L., Lesh, S.M. 2005b. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity part II. Case study. *Computer and Electronic in Agriculture* 46: 135–152.
- Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2006. Centro Nacional de Pesquisa

- de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro, Brasil. 412 p.
- Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2008. Embrapa Soja: Embrapa Cerrados: Embrapa Agropecuária Oeste. *Tecnologias de produção de soja para região central do Brasil*. Londrina, Paraná, Brasil. 262 p.
- Lesch, S.M., Corwin, D.L., Robinson, D.A. 2005. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. *Computer and Electronic in Agriculture* 46: 351-378.
- Lima, C.G.R., Carvalho, M.P., Narimatsu, K.C.P., Silva, M.G., Queiroz, H.A. 2010. Atributos físico-químicos de um latossolo do cerrado brasileiro e sua relação com características dendrométricas do eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34: 163-173.
- Machado, P.L.O.A., Bernardi, A.C.C., Valencia, L.I.O., Molin, J.P., Gimenez, L.M., Silva, C.A., Andrade, A.G., Medari, B.E., Meirelles, M.S.P. 2006. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília* 41: 1023-1031.
- Molin, J.P., Castro, C.N. 2008. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. *Scientia Agricola* 65: 567-573.
- Montgomery, D.C., Runger, G.C. 2009. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. LTC, Rio de Janeiro, Brasil. 493 p.
- Morari, F., Castrignano, A., Pagliarin, C. 2009. Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geoelectrical sensors. *Computer and Electronic in Agriculture* 68: 97-107.
- Novais, R.F., Alvarez, V.H., Barros, N.F., Fontes, R.L.F., Cantarutti, R.B., Neves, J.C.L. 2007. *Fertilidade do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. p. 471-550.
- Novais, R.F., Smyth, T.J. 1999. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Editora UFV, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 399 p.
- Resende, A.V.S., Hiratsuchi, L.S., Sena, M.C., Krahl, L.L., Oliveira, J.V.E., Corrêa, R.F., Oro, T. 2006. Grades amostrais para fins de mapeamento da fertilidade do solo em área de cerrado. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 2. 2006. São Pedro, São Paulo, Brasil. Anais. Piracicaba: Esalq. CD-Rom.
- Rosa Filho, G., Carvalho, M.P., Andreotti, M., Montanari, R., Binotti, F.F.S., Gioia, M.T. 2009. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33: 283-293.
- Saey, T., Van, M., Vermeersch, H., Ameloot, N., Cockx, L. 2009. A Pedotransfer function to evaluate the soil profile textural heterogeneity using proximally sensed apparent electrical conductivity. *Geoderma* 150: 389-395.
- Sanchez, R.B., Marques Júnior, J., Souza, Z.M., Pereira, G.T., Martins Filho, M.T. 2009. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. *Bragantia* 68: 1095-1103.
- Silva, S.A., Lima, J.S.S., Souza, G.S., Oliveira, R.B., Silva, A.F. 2010. Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. *Revista Ciência Agronômica* 41: 1-8.
- Silveira, P.M., STONE, L.F. 2001. Teores de nutrientes e matéria orgânica afetados pela rotação de culturas e sistema de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 25: 387-394.
- Souza, Z.M., Alves, M.C. 2003. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distroférico de cerrado sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 27: 133-139.
- Warrick, A.W., Nielsen, D.R. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed). *Applications of soil physics*. Academic, New York, Unites States. 385 p.
- Yan, L., Zhou, S., Ci-Fang, W., Fang, L., Hong-Yi, L. 2007b. Optimised spatial sampling scheme for soil electrical conductivity based on variance quad-tree (VQT) method. *Agricultural Sciences in China* 6: 1463-1471.
- Yan, L., Zhou, S., Ci-Fang, W., Hong-Yi, L., Fang, L. 2008. Determination of potential management zones from soil electrical conductivity, yield and crop data. *Journal of Zhejiang University Science B (Biomedicine & Biotechnology)* 9: 68-76.
- Yan, L., Zhou, S., Feng, L. 2007a. Delineation of site-specific management zones based on temporal and spatial variability of soil electrical conductivity. *Pedosphere* 17: 156-164.
- Yan, L., Zhou, S., Feng, L., Hong-Yi, L. 2007c. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. *Computers and Electronics in Agriculture* 56: 174-186.