

## DEFINIÇÃO DE UNIDADES DE GERENCIAMENTO DO SOLO ATRAVÉS DA SUA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E VARIÁVEIS FÍSICO-QUÍMICAS UTILIZANDO CLASSIFICAÇÃO FUZZY

CÉSAR N. CASTRO<sup>1</sup>, JOSÉ P. MOLIN<sup>2</sup>

### RESUMO

A definição de unidades de gerenciamento do solo que consigam com sucesso representar regiões homogêneas quanto a atributos que influenciam o desenvolvimento das culturas é uma das etapas mais desafiadoras no contexto da agricultura de precisão. O método mais comum de se realizar essa tarefa é utilizando informações contidas nos mapas de produtividade, no entanto também é possível se concretizar esse objetivo utilizando informações sobre o solo. Nesse trabalho o solo foi monitorado para a condutividade elétrica (CE) e mais 11 outras variáveis físico-químicas, visando definir unidades de gerenciamento homogêneas quanto a essas variáveis, avaliando ainda a importância da CE nessa definição e sua correlação com as demais variáveis. Os resultados indicaram a utilidade da CE além de comprovarem a eficácia do procedimento realizado. Devido a elevada correlação da mesma com o conteúdo de argila do solo.

**PALAVRAS-CHAVE:** agricultura de precisão, condutividade elétrica, lógica fuzzy.

## DELINEATION OF SITE-SPECIFIC MANAGEMENT ZONES USING ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND SOIL FERTILITY ATTRIBUTES BY FUZZY LOGIC

### SUMMARY

The delineation of site-specific management zones that can successfully define uniform regions of soil fertility attributes that are of importance to crop growth is one of the most challenging steps in precision agriculture. The most common method of doing so is using information from yield maps; nevertheless, it is possible to accomplish it using information from the soil. In this study the soil was sampled for its electrical conductivity and 11 others physical-chemical properties, aiming to define uniform site-specific management zones with regards to those variables. The importance of the electrical conductivity in this process was evaluated, as was its correlation with the soil fertility attributes. The results confirmed the utility of the electrical conductivity in the definition of the management zones and the feasibility of the delineation method proposed.

**KEY-WORDS:** precision agriculture, electrical conductivity, fuzzy logic.

### INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão é um ramo de pesquisa relativamente recente na área agrícola e é possivelmente a que apresenta as perspectivas mais promissoras na geração de novas tecnologias e propostas de gerenciamento da lavoura, otimizadoras de insumos e que permitam diminuição nos custos de produção, ou aumento da produção por área, além de possíveis benefícios ambientais. De forma a conseguir a máxima eficiência dos insumos agrícolas aplicados, pela utilização dessas técnicas, unidades de gerenciamento devem ser criadas, as quais representem uma combinação homogênea de fatores potenciais limitantes da produtividade (FRIDGEN et al., 2000). No contexto da agricultura de precisão essas unidades são referentes a regiões geográficas que possuem atributos de relevo e do solo com mínima heterogeneidade (LUCHIARI JR. et al., 2000). Comumente, a determinação dessas áreas homogêneas dentro do talhão é difícil devido a complexa combinação entre os fatores que podem influenciar a produtividade das culturas.

Diversas metodologias para se definir essas unidades de gerenciamento foram propostas, entre elas a utilização da topografia, fotografias aéreas, imagens do dossel das culturas, sensoriamento remoto

<sup>1</sup> Engº Agrônomo, Mestrando em Agronomia, Depto. de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", ESALQ-USP, Piracicaba, SP, (0XX19) 34294149 – R: 230, e-mail: [cncastro@esalq.usp.br](mailto:cncastro@esalq.usp.br)

<sup>2</sup> Eng. Agrícola, Professor Doutor, ESALQ/USP, Piracicaba, SP. Fone 19 3429 4165, e-mail: [jpmolin@esalq.usp.br](mailto:jpmolin@esalq.usp.br)

(MOLIN, 2001), além do mapeamento da produtividade, que é, dentre essas camadas de informações, a mais divulgada atualmente.

No entanto, LUND et al. (2000) afirmam que muitos produtores têm dúvidas quanto a estabelecer metas de produtividades localizadas na lavoura utilizando somente dados de produtividade, por causa da dúvida sobre se dados históricos dessa variável são provas suficientemente fortes de uma tendência existente na lavoura. Nesse sentido alguns autores citam que aliado a essa informação contida nos mapas de produtividade para a prática da agricultura de precisão ser bem sucedida, métodos precisos e eficientes de avaliar a variabilidade espacial do potencial produtivo do solo devem ser utilizados (FRIDGEN et al., 2000; LUND et al., 2000).

Por esses motivos a condutividade elétrica tem recentemente atraído a atenção por ser, segundo alguns autores, um método rápido e custo-efetivo de indicar a produtividade do solo (McBRIDE, 1990). Esta, por sua vez, depende do teor de água, da composição química da solução do solo e dos íons trocáveis, da porcentagem de argila no solo, e da interação entre os íons não trocáveis e os trocáveis (NADLER & FRENKEL, 1980).

A dependência da condutividade elétrica do solo em relação a esses fatores permitiu a utilização da mesma visando monitorar a variabilidade espacial de diversas propriedades do solo, como por exemplo o seu teor de água (SHEETS & HENDRICKX, 1995); CTC e Ca e Mg trocáveis (McBRIDE et al., 1990), conteúdo de argila do solo (WILLIAMS & HOEY, 1987).

Entre os vários procedimentos disponíveis para análise de dados visando definir as unidades de gerenciamento do solo, um ainda pouco explorado é o agrupamento fuzzy e suas diferentes técnicas. MINSASNY & McBRATNEY (2000) apresentam uma delas, conhecida como fuzzy k-means, cujo objetivo é identificar agrupamentos naturais ocorrendo nos dados (FRIDGEN et al., 2000). BURROUGH et al. (1997) apresentam a utilização dessa técnica para classificação de atributos do solo.

O objetivo desse trabalho foi: (1) realizar o monitoramento da condutividade elétrica do solo numa área de 35,8 ha, analisar o comportamento de sua variabilidade espacial e confrontar essa com a variabilidade espacial de características físico-químicas do solo; (2) analisar a correlação dessas variáveis com os valores de condutividade elétrica obtidos; (3) realizar uma análise multivariada (análise de componentes principais) entre todas essas variáveis juntas para identificar quais eram as maiores responsáveis pela variabilidade do solo nessa área e (4) definição de unidades de gerenciamento do solo utilizando a condutividade elétrica e as demais variáveis físico-químicas através da técnica de agrupamento *fuzzy k-means*.

## MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho faz parte de um projeto maior que vem sendo conduzido desde 1998 na região dos Campos Gerais, PR, em parceria entre a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (Piracicaba, SP) e a Fundação ABC (Castro, PR). Esta etapa do projeto foi realizada numa área de 35,8 ha, localizada no município de Ponta Grossa, PR, cultivada sob plantio direto nas safras de verão num sistema de rotação soja-milho e no inverno com trigo ou aveia para produção de palhada.

A condutividade elétrica do solo (CE) foi medida em outubro de 2002 utilizando o sensor Veris 3100®, com seu respectivo sistema de aquisição dos dados. Esse sensor coletou a informação CE simultaneamente em duas profundidades distintas, respectivamente as leituras rasa (0-0,3m) e profunda (0-0,9m). O equipamento utiliza como sensores seis eletrodos conectados a discos de corte lisos que penetram no solo, e com o deslocamento no campo, um par desses eletrodos transmitem uma corrente elétrica ao solo, enquanto que os outros dois pares medem a diferença de potencial que ocorre no campo eletromagnético gerado no solo devido a corrente elétrica aplicada. O programa do seu coletor de dados realiza a conversão da queda de voltagem ocorrida no solo para a condutividade elétrica, registrada em mS m<sup>-1</sup>. O sistema de aquisição de dados da CE gravava as leituras emitidas pelo sensor a cada segundo, além do seu posicionamento geográfico por estar está conectado a um receptor de sinais do sistema de posicionamento global (GPS) com correção diferencial via satélite geostacionário (DGPS).

Amostras georreferenciadas de solo foram coletadas no inverno de 2001, na profundidade de 0-0,1m, num total de 71 amostras, constituindo uma densidade amostral de 1,9 amostras ha<sup>-1</sup>. Nessas amostras determinaram-se os valores de: potencial de hidrogênio (pH), determinado em solução CaCl<sub>2</sub>; matéria orgânica (MO) (g dm<sup>-3</sup>), determinada pelo método de Walkley-Black; fósforo (mg dm<sup>-3</sup>), extraído por resina; potássio (K) (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Ca (Ca) (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e magnésio (Mg) (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) extraídos por resina e

argila (%) e areia (%) determinados pelo método de dispersão total. Além desses atributos foram calculados os valores da soma de bases (SB) ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ), da capacidade de troca de cátions (CTC) ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ), e da saturação por bases (V%)(%). Essas amostras foram analisadas no laboratório da Fundação ABC, localizado na cidade de Castro, PR.

Para análise dos dados inicialmente foi realizada a construção dos semivariogramas experimentais para as distribuições da CE e das demais variáveis físico-químicas do solo. O estimador do semivariograma utilizado foi o estimador clássico, ou método dos momentos (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Após a análise de dependência espacial dessas variáveis, foram realizadas estimativas em locais não amostrados, com o intuito de gerar mapas de superfície das mesmas e para digitalização e visualização dessa informação utilizou-se da krigagem ordinária por blocos (ou células), com tamanho dos blocos de 10,0m de lado.

Para verificar possíveis relações entre as variáveis realizou-se o cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson entre as variáveis físico-químicas do solo com a CE do mesmo nas duas profundidades de leitura, utilizando como dados de cada uma os valores das células interpoladas pela técnica de krigagem ordinária.

Na seqüência foi realizada a análise de componentes principais (CP), que é uma técnica estatística multivariada que transforma linearmente um conjunto de dados de diversas variáveis. Essa técnica, na prática, transforma variáveis interdependentes em independentes e significantes. Essa transformação linear permitiu comprimir o conjunto de dados original em um conjunto substancialmente menor de variáveis não correlacionadas, os CP, que representam a maior parte da informação contida no conjunto de dados original (AFIFI & CLARK, 1996). Utilizou-se dessa técnica para determinar quais variáveis do solo (incluindo a CE), eram as mais importantes na caracterização da variabilidade do mesmo e, através da utilização das novas variáveis (os CP) obtidas da mesma, realizar o processo de classificação, visando a definição de unidades de gerenciamento do solo. Os mesmos conjuntos de valores de cada variável obtidos do processo de krigagem ordinária por blocos foram utilizados nesta. A seleção dos CP foi feita após avaliação de diversos critérios apresentados por AFIFI & CLARK (1996), sendo escolhido o de reter os CP cujos valores acumulados da matriz de correlação expliquem 80% da variância total dos dados. Essa análise foi realizada no programa Statistica (STATSOFT, 1999).

A etapa seguinte foi a realização da classificação dos CP selecionados, com o objetivo de identificação de agrupamentos naturais ocorrendo nos mesmos. Esse processo de classificação foi utilizado como método para agrupamento dessas variáveis transformadas (componentes principais), onde cada agrupamento natural compõe uma unidade de gerenciamento do solo distinta. O algoritmo utilizado foi o *fuzzy k-means*. Para execução dessa análise utilizou-se o programa FuzME (MINASNY & McBRATNEY, 2000). Inicialmente foi necessário escolher o critério de distância (euclideana, mahalanobis ou diagonal) e o expoente fuzzy que mede o grau de superposição entre os grupos. Informações sobre essa técnica podem ser encontradas em BURROUGH et al.(1997) e MINASNY & McBRATNEY (2000).

Por último realizou-se a análise de variância (ANOVA) para as variáveis CE e demais atributos físico-químicos do solo entre as diferentes unidades de gerenciamento determinadas, para verificar se entre estas existiam diferenças significativas entre as médias das variáveis. A unidade a qual cada indivíduo (célula) pertence foi utilizada como variável dependente da ANOVA. Para realizar as comparações entre as unidades de gerenciamento foi utilizado o teste HSD (“Honest Significant Difference”) de Tukey para amostras de diferentes tamanhos, sendo essa análise realizada no programa Statistica (STATSOFT, 1999).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os semivariogramas foram calculados para as variáveis CE do solo nas duas profundidades e para as demais características físico-químicas do solo, sendo apresentado na Tabela 1 os parâmetros efeito pepita, patamar, alcance, modelo dos semivariogramas calculados além dos valores da soma dos erros quadrados que foi o critério adotado para escolha do melhor ajuste de cada modelo e do componente estrutural ( $C1/C0+C1$ ), que representa o quanto da variância dos dados pode ser explicada pela dependência espacial (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Observando os resultados da Tabela 1 percebe-se que, no geral, a dependência espacial dessas variáveis explicou grande parte da variação das mesmas, como pode ser verificado pelos valores do componente estrutural. Além disso, nota-se uma diferença entre os valores baixos da soma dos quadrados dos erros (SSE) para a variável CE nas duas profundidades em contrapartida para os valores, em média, mais elevados desse índice para as demais variáveis físico-

químicas do solo analisadas em laboratório. Esse fato se explica devido a diferença da densidade amostral daquelas variáveis ( $355,2$  amostras  $ha^{-1}$ ) em relação a essas ( $1,9$  amostras  $ha^{-1}$ ), causando um comportamento da função semivariância mais errático para as variáveis do segundo grupo e conseqüentemente piores ajustes do modelo. Nesse fato reside uma das vantagens do monitoramento da CE do solo, pois como ela permite a coleta de muitas amostras de forma rápida e com baixo custo, isso gera mapas que modelam a variabilidade espacial do solo de maneira mais precisa.

**TABELA 1** – Parâmetros dos semivariogramas para a CE do solo nas leituras rasa (0-0,3m) e profunda (0-0,9m) e demais variáveis físico-químicas do solo.

Variável	Efeito pepita (C0)	Patamar (C0+C1)	Alcance (a)	SSE <sup>1</sup>	$C1/C0+C1$ <sub>2</sub>	Modelo <sup>3</sup>
CE (0-	0,30	1,09	15,85	0,05	0,72	Exp.
CE (0-	0,08	0,31	11,65	$3 \cdot 10^{-3}$	0,74	Exp.
$\hat{P}$	223,2	542,7	253,5	9045,6	0,59	Esf.
MO	4,9	63,0	375,8	123,3	0,92	L. c/ pat.
PH	0,01	0,03	579,6	$1 \cdot 10^{-5}$	0,67	Gaus.
K	0,41	0,68	352,2	$8 \cdot 10^{-3}$	0,40	Esf.
Ca	16,13	83,32	340,6	57,40	0,81	Exp.
Mg	3,51	30,51	198,2	8,00	0,88	Exp.
SB	35,42	173,52	393,8	363,8	0,80	Esf.
CTC	1,73	149,83	253,6	849,5	0,99	Esf.
V%	40,59	67,53	375,8	87,42	0,40	Esf.
Argila	15,46	-	-	$7 \cdot 10^{-3}$	-	Fun. pot.
Areia	18,55	-	-	774,9	-	Fun. pot.

<sup>1</sup> Soma dos erros quadrados; <sup>2</sup> Componente estrutural; <sup>3</sup> Exp.= Exponencial; Esf.= Esférico; Ef. Pep.= Efeito pepita puro; L. c/ pat.= Linear com patamar; Gaus.= Gaussiano; Fun. pot.= Função potência.

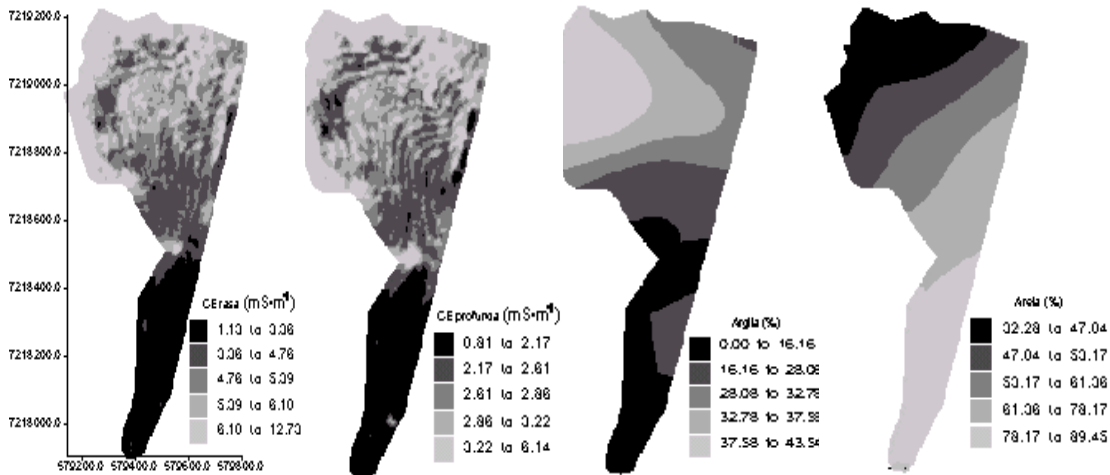
A partir desses semivariogramas foi possível gerar os mapas de superfície de cada variável monitorada nesse trabalho utilizando a interpolação por krigagem. Na Figura 1 são apresentados alguns dessas mapas, especificamente para as variáveis CE rasa (0-0,3m), CE profunda (0-0,9m) e para os teores de argila e de areia. Observando esses mapas é nítida a semelhança entre os mesmos. A aparência mais “suave” da distribuição dos valores da textura do solo em relação a CE do mesmo é causada pela diferença na densidade amostral para ambas, mesmo assim a inspeção visual desses mapas indica boa concordância entre ambos. Essa relação da CE com a textura do solo já foi relatado por WILLIAMS & HOEY (1987).

A partir dos mapas de superfície gerados avaliou-se a correlação da CE rasa e profunda com os atributos físico-químicos do solo. Na Tabela 2 são apresentados os resultados dessas correlações. Quanto à relação da CE rasa com os atributos do solo analisados em laboratório diversas correlações médias e fortes puderam ser identificadas dessa com: P; MO; pH; K; Ca; Mg; SB; CTC; V%; argila e areia. Também para a CE profunda se verificaram várias correlações de média e elevada intensidade com os atributos do solo: P; MO; pH; K; Ca; Mg; SB; CTC; V%; argila e areia. Especificamente essa forte relação da CE com a textura do solo é um indício promissor da utilização da mesma na definição de unidades de gerenciamento do solo nessa área.

**TABELA 2** - Coeficientes de correlação entre a CE rasa (0-0,3m) e profunda (0-0,9m) com os demais atributos físico-químicos do solo.

Variáveis	P	MO	pH	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%	Arg*	Areia
CE (0-0,3m)	-0,68	0,86	-0,41	0,87	0,84	0,63	0,84	0,77	0,76	0,75	-0,86
CE (0-0,9m)	-0,64	0,82	-0,42	0,81	0,81	0,60	0,81	0,74	0,73	0,66	-0,79

\* = Argila.



**FIGURA 1** - Mapas da CE do solo nas leituras rasa (0-0,3m) e profunda (0-0,9m)(mS m<sup>-1</sup>) e dos teores de argila e areia (%).

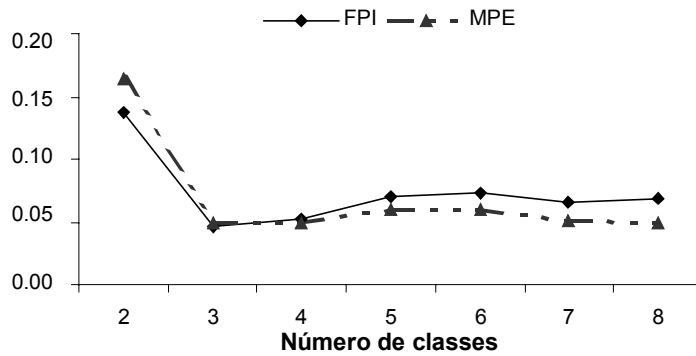
Observando as correlações obtidas entre as variáveis do solo com a CE em ambas as profundidades, é possível se identificar uma série de correlações de moderada a forte intensidade entre elas. Essas interações são fatores limitantes à utilização da análise de correlações simples na interpretação desses dados. Foi, então, utilizada a técnica conhecida como análise de componentes principais, com o objetivo de reduzir o número de variáveis, que posteriormente serão utilizadas para geração das unidades de gerenciamento, sem a perda de informação importante. Também procurou-se avaliar se a CE, em ambas as profundidades, de alguma forma auxilia na definição das unidades de gerenciamento do solo. Na Tabela 3 são apresentados os resultados dessa análise.

**TABELA 3** – Análise de componentes principais para as variáveis físico-químicas do solo coletadas.

Componentes de variância	Componentes principais	
	1	2
Variância	9,98	1,01
Proporção (%)	76,75	7,78
Proporção acumulada (%)	76,75	84,53
Variáveis	Correlação com os componentes principais	
CE (0-0,3m)	0,91	-0,06
CE (0-0,9m)	0,87	-0,03
P	-0,83	-0,38
MO	0,96	0,14
pH	-0,51	-0,79
K	0,98	0,03
Ca	0,95	-0,17
Mg	0,76	-0,19
SB	0,95	-0,21
CTC	0,90	0,05
V%	0,87	-0,32
Argila	0,85	-0,03
Areia	-0,95	0,04

Do conjunto total de 13 variáveis originais foram selecionados dois CP, os quais somados explicam 84,53% da variância total desses dados. O primeiro CP (responsável por 76,75% da variabilidade) é fortemente influenciado por todas as variáveis originais com exceção do pH, podendo ser visto como sendo o potencial de fertilidade inerente ao solo. Devido a relação direta da maioria das variáveis originais com esse CP, percebe-se que regiões com maiores valores do mesmo serão aquelas mais férteis. Além disso é importante destacar a grande intensidade da influência da CE tanto rasa quanto profunda sobre esse CP (com correlações com o primeiro componente principal respectivamente igual a 0,91 e 0,87), indicando importância dessa informação no auxílio para explicar a variabilidade espacial físico-química geral do solo nessa área. O segundo CP apresentou uma relação mais intensa apenas com o pH, sendo aproximadamente o inverso do primeiro CP, no qual a influência relativa do pH foi baixa.

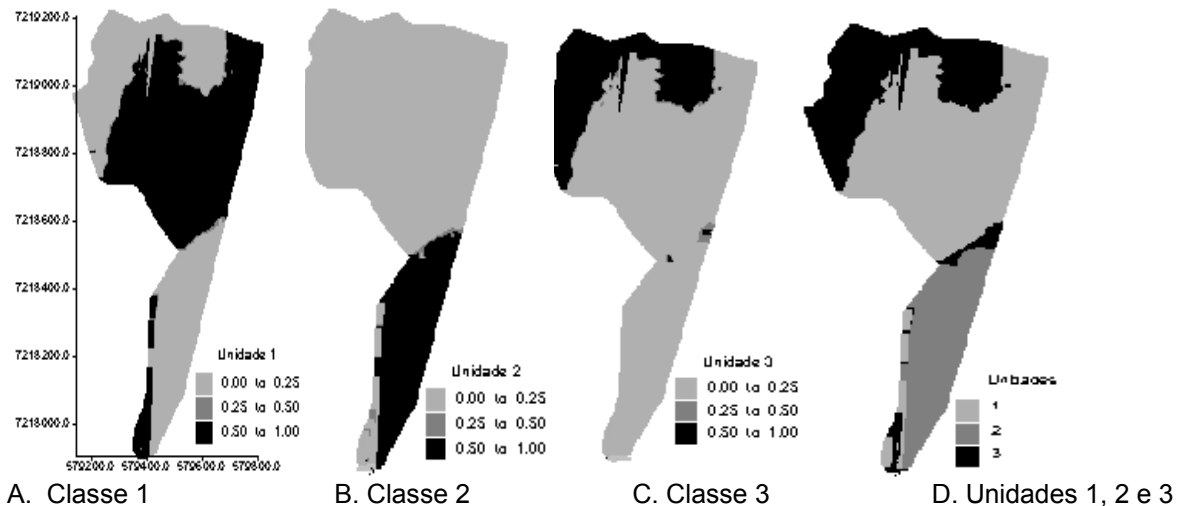
Na etapa seguinte foi utilizada a técnica de classificação contínua *fuzzy k-means* para se definir as unidades de gerenciamento do solo a partir dos dois CP apresentados na Tabela 3. Utilizou-se o critério de distância euclidiana e o expoente fuzzy igual a 1,2. Para se determinar o número ótimo de unidades de gerenciamento em cada uma das áreas utilizou-se o índice de desempenho fuzzy (FPI – “Fuzziness Performance Index”) e a partição da entropia modificada (MPE – “Modified Partition Entropy”), dois índices fornecidos pelo próprio programa FuzMe (MINASNY & McBRATNEY, 2000). O número ótimo de classes de agrupamentos (unidades de gerenciamento) é então definido como aquele no qual esses dois índices atinjam um mínimo (FRIDGEN et al., 2000). Na Figura 2 é apresentado o gráfico com os valores dos índices FPI e MPE em função do número de classes de agrupamento dos dados.



**FIGURA 2** – Gráfico do desempenho do agrupamento em função do número de classes.

Observando o resultado apresentado na Figura 2, verifica-se que ambos os índices atingem um valor mínimo para a divisão da área em 3 classes (3 unidades de gerenciamento), indicando ser esse o número ótimo de unidades de gerenciamento do solo com base nas variáveis amostradas.

Realizou-se então a classificação fuzzy dos dois CP selecionados anteriormente, na qual o indivíduo pode ter participação total, parcial ou nula em cada uma das diferentes classes. Na Figura 3 são apresentados os mapas dos três agrupamentos com as respectivas unidades de gerenciamento resultantes dessa classificação.



**FIGURA 3** – Mapas com a distribuição espacial dos valores da função de participação de cada indivíduo nas três classes, geradas após classificação pelo algoritmo fuzzy-k-means dos dois componentes principais selecionados e o respectivo mapa com as unidades de gerenciamento resultantes.

O resultado final da classificação fuzzy fornece valores da função de participação de cada indivíduo (dado) do conjunto original de dados em cada uma das classes geradas. Essa função pode

assumir valores entre 0,0 (nenhuma possibilidade de participação nessa classe) até 1,0 (total participação na classe). Nesse trabalho o agrupamento dos indivíduos cuja função de participação numa mesma classe superou 0,50 foi considerado como uma unidade de gerenciamento distinta, conforme pode ser visto nos mapas de A-C na Figura 3. A continuidade espacial dessas unidades de gerenciamento é muito grande, podendo ser considerado um indício do sucesso da classificação, pois facilita, posteriormente, as operações de gerenciamento dessa área. É interessante se confrontar esses mapas das unidades de gerenciamento nessa área com os mapas das distribuições espaciais da argila e da areia (Figura 1), sendo a partir da comparação dessas camadas de informação, fácil de se perceber a influência da granulometria do solo sobre o comportamento físico-químico do mesmo, e devido a relação da CE medida nas duas profundidades com a mesma ( $r=0,75$ , e  $0,66$ , para as relações respectivamente da CE rasa e profunda com o conteúdo de argila do solo), constata-se a validade dessa informação na definição das unidades de gerenciamento nessa área.

A última etapa do trabalho foi a realização da análise de variância (ANOVA) com o objetivo de se verificar se existem diferenças entre as variáveis CE em ambas as profundidades e físico-químicas do solo entre as diferentes unidades de gerenciamento criadas pelo algoritmo fuzzy k-means. Quanto maiores essas diferenças mais se confirma a validade da divisão realizada, assim como se o processo de redução do número de variáveis (análise de componentes principais), conseguiu expressar de forma adequada o modelo da variabilidade espacial das mesmas. Na Tabela 4 são apresentados os resultados da ANOVA entre as unidades de gerenciamento para as variáveis do solo. Observa-se que a relação da CE rasa e profunda com o teor de argila do solo é considerável, de acordo com a ordem crescente das médias dessas variáveis entre as unidades. Além disso, a maior parte dos atributos do solo analisados acompanham essa tendência nessa área, com a unidade 3 sendo aquela com os maiores índices de fertilidade do solo. As diferenças encontradas entre as unidades para todas essas variáveis foram significativas, comprovando a viabilidade da classificação proposta e indicando a possibilidade de gerenciamento diferenciado entre essas unidades para os atributos do solo amostrados.

**TABELA 4** – Média das variáveis físico-químicas do solo por unidade de gerenciamento.

Unidade	Variáveis*†												
	CE	CE	P	MO	pH	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%	Arg.	Are.
1	5,2 <sup>b</sup>	2,8 <sup>b</sup>	40,2 <sub>b</sub>	40,5 <sub>a</sub>	4,8 <sup>a</sup>	2,0 <sup>c</sup>	2,7 <sup>b</sup>	29,6 <sub>b</sub>	15,0 <sub>b</sub>	47,0 <sub>b</sub>	46,4 <sub>b</sub>	29,7 <sub>b</sub>	57,9 <sub>b</sub>
2	2,4 <sup>a</sup>	1,7 <sup>a</sup>	93,1 <sub>c</sub>	20,1 <sub>b</sub>	5,0 <sup>c</sup>	1,0 <sup>a</sup>	1,3 <sup>a</sup>	19,4 <sub>a</sub>	9,6 <sup>a</sup>	29,5 <sub>a</sub>	41,5 <sub>a</sub>	13,1 <sub>c</sub>	83,9 <sub>c</sub>
3	6,6 <sup>c</sup>	3,4 <sup>c</sup>	38,9 <sub>a</sub>	46,7 <sub>c</sub>	4,9 <sup>b</sup>	1,6 <sup>b</sup>	3,2 <sup>c</sup>	37,0 <sub>c</sub>	20,2 <sub>c</sub>	61,7 <sub>c</sub>	51,7 <sub>c</sub>	37,5 <sub>c</sub>	43,7 <sub>a</sub>

- CE r.= condutividade elétrica rasa (0-0,3m); CE p.= condutividade elétrica profundo (0-0,9m); Arg.= conteúdo de argila; Are.= conteúdo de areia. † Dentro de uma mesma coluna médias das variáveis seguidas por letras distintas são significativamente diferentes entre as unidades de gerenciamento de acordo com o teste HSD de Tukey para amostras desemparelhadas ( $P= 0,05$ ).

## CONCLUSÕES

A definição de unidades de gerenciamento do solo diferenciadas dentro de uma área é uma tarefa difícil, dependendo da interação de inúmeras características do mesmo e da resposta fisiológica das plantas cultivadas frente a esse complexo sistema. A maneira pela qual essa definição foi realizada nesse trabalho, utilizando a CE e demais variáveis físico-químicas do solo, e utilizando da geoestatística, da análise de componentes principais e da lógica fuzzy para tratar esses dados, comprovou-se para essa área ser um procedimento viável, conseguindo delimitar regiões homogêneas e distintas entre elas quanto aos atributos do solo utilizados. A relação da CE rasa e profunda com o conteúdo de argila ( $r=0,75$  e  $0,66$  respectivamente), indicaram a viabilidade dessa informação na delimitação das unidades de gerenciamento do solo, visto que aquele é o principal fator que controla a variabilidade espacial dos demais indicadores da fertilidade do solo. Outras pesquisas que mostrem a utilidade da CE com esse mesmo objetivo para outras localidades, com características do solo outras que as encontradas nesse estudo se fazem necessárias.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFIFI, A. A.; CLARK, V. **Computer-aided multivariate analysis**. Chapman & Hall, New York. 1996. 455 p.
- BURROUGH, P. A.; VAN GAANS, P. F. M.; HOOTSMANS, R. Continuous classification in soil survey: spatial correlation, confusion and boundaries. **Geoderma**, v. 77, p. 115-135. 1997.
- FRIDGEN, J. J.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A. Variability of soil and landscape attributes within sub-field management zones. In: International Conference on Precision Agriculture, 5., 2000, Bloomington. **Proceedings eletrônicos do 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture**, Bloomington: ASA-CSSA-SSSA, 2000. 1CD.
- ISAAKS, E. H; SRIVASTAVA, R. M. **Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.
- LUCHIARI JR., A.; SHANAHAN, J.; FRANCIS, D.; SCHLEMMER, M.; SCHEPERS, J; LIEBIG, M.; SCHEPERS A.; PAYTON, S. Strategies for establishing management zones for site specific nutrient management. In: International Conference on Precision Agriculture, 5., 2000, Bloomington. **Proceedings eletrônicos do 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture**, Bloomington: ASA-CSSA-SSSA, 2000. 1CD.
- LUND, E. D.; CHRISTY, C. D.; DRUMMOND, P. E. Using yield and soil electrical conductivity (EC) maps to derive crop production performance information. In: International Conference on Precision Agriculture, 5., 2000, Bloomington. **Proceedings eletrônicos do 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture**, Bloomington: ASA-CSSA-SSSA, 2000. 1CD.
- McBRIDE, R.A; GORDON, A.M; SHRIVE, S.C. Estimating Forest Soil Quality from Terrain Measurements of Apparent Electrical Conductivity. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.54, p. 255-260. 1990.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B. FuzME version 2.1. Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney. 2002. Disponível no site <http://www.usyd.edu.au/su/agri/acpa>. Acesso em: 23 de fev. de 2002.
- MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão – o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba, o autor. 2001. 83 p.
- NADLER, A; FRENKEL, H. Determination of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity measurements by the four electrode method. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, n.5, p. 1216-1221. 1980.
- SHEETS, K.R; HENDRICKX, J.M.H. Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction. **Water Resources Research**, Washington, v. 31, n. 10, p. 2401-2409. 1995.
- STATSOFT. Statistica. Statsoft, Tulsa, OK. 1999.
- WILLIAMS, B.G; HOEY, D; The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 25, n.1, p. 21-27. 1987.