

Variabilidade espacial de atributos químicos de solo sob pastagem

Spatial variability of chemical properties of soil under pasture

Samuel Ferreira da Silva^{*}
Danilo Ferreira Mendes^{**}
Pedro Quarto Junior^{***}
Wallace Luís de Lima^{****}
Otacilio José Passos Rangel^{*****}
Jéferson Luiz Ferrari^{*****}

Objetivou-se neste trabalho analisar a variabilidade espacial de atributos químicos de solo sob pastagem e as recomendações de calagem e adubação baseadas na interpretação das análises químicas de solo provenientes de dois métodos de amostragem: convencional e sistemático nas profundidades de 0 a 10 e 10 a 20 cm. O estudo foi realizado no Ifes *campus* de Alegre-ES. A análise dos dados foi realizada por meio da estatística descritiva e da geoestatística. Os resultados indicaram que o método espacial possibilitou identificar zonas de *deficit* e excesso de recomendação de calagem e adubação, que não poderiam ser definidas com o método convencional.

The objective of this study was to analyze the spatial variability of soil chemical attributes under pasture, as well as lime and fertilizer recommendations based on the interpretation of soil chemical analysis from two sampling methods: conventional and systematic depths of 0 to 10 and 10 to 20 cm. The study was conducted at IFES-campus Alegre-ES. Data analysis was performed using descriptive statistics and geostatistics. Results indicate that the spatial method enabled the identification of deficit areas and excessive liming and fertilization, which could not be defined by the conventional method.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Análise e fertilidade do solo. Geoestatística.

Keywords: Precision agriculture. Analysis and soil fertility. Geostatistics.

1 Introdução

As áreas de pastagens constituem a base da produção agropecuária no País e no mundo, permitindo gerar vários produtos, desde os tradicionais como carne, leite e

^{*} Mestre em Produção Vegetal pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Doutorando em Produção Vegetal pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES - *campus* de Alegre) - Alegre/ES - Brasil. E-mail: samuelfd.silva@yahoo.com.br.

^{**} Graduado em Tecnologia em Cafeicultura pelo Instituto Federal do Espírito Santo (IFES *campus* de Alegre). Pós-graduando nível especialização em Agroecologia pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - (IFES *campus* de Alegre) - Alegre/ES - Brasil. E-mail: danilofmendes@gmail.com.

^{***} Mestre em Produção Vegetal pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Agrimensor na Empresa Quality Geomatics Ltda. Alegre/ES - Brasil. E-mail: quartojunior@yahoo.com.br.

^{****} Doutor em Agronomia (Ciências do Solo) pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - (UFRRJ). Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - (IFES *campus* de Alegre) - Alegre/ES - Brasil. E-mail: wallace@ifes.edu.br.

^{*****} Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras - (UFLA). Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - (IFES *campus* de Alegre) - Alegre/ES - Brasil. E-mail: ojprangel@ifes.edu.br.

^{*****} Doutor em Produção Vegetal pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - (IFES *campus* de Alegre) - Alegre/ES - Brasil. E-mail: ferrarijuliz@gmail.com.

lá, até outros de importância específica, como a proteção do solo, a manutenção da paisagem e utilidade social (REZENDE et al., 2011).

No Estado do Espírito Santo, segundo o Plano Estratégico de Desenvolvimento da Agricultura Capixaba, as pastagens ocupam 1.821.069 ha, sendo que este valor representa 39,43% do total da área agrícola produtiva (PEDEAG, 2014).

Zelar pela conservação de tais ambientes é assim fundamental, pois o conhecimento da variabilidade espacial das propriedades do solo torna-se útil na avaliação da fertilidade do solo para fins de recomendação de adubação, implementação e manejo das pastagens (GREGO et al., 2012; AQUINO et al., 2014).

A amostragem do solo constitui-se na primeira etapa de um programa racional de recomendação de corretivos e fertilizantes a serem aplicados em uma propriedade agrícola. Quando realizada de forma correta, a amostragem permite evitar o emprego antieconômico de calcário e fertilizante, aumentar a produtividade e reduzir os impactos negativos da ação antrópica no ambiente. Desta forma, o conhecimento da variabilidade dos atributos do solo constitui-se em uma importante ferramenta para o emprego do manejo adequado e para elaboração do planejamento experimental (LIMA et al., 2014).

De acordo com Guarçoni et al. (2006), a representatividade adequada da amostragem do solo está diretamente relacionada com a qualidade das amostras simples, devendo ser observados quesitos como: número de amostras, profundidade, volume e condições de fertilidade de seus respectivos locais de coleta. A não observação desses quesitos pode mascarar os resultados e levar a interpretações e recomendações errôneas.

Quanto ao número de amostras, o método convencional de amostragem de solo usado por muitos produtores rurais dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, entre outros, prevê a coleta de no mínimo 20 amostras simples de solo para compor uma amostra composta representativa de uma área homogênea não superior a 10 hectares (PREZOTTI et al., 2007).

Esta particularidade do método convencional faz com que a tomada de decisão sobre a realização do manejo químico do solo seja feita em função da média dos valores das propriedades químicas das amostras, levando-se em consideração que a inexistência de dependência espacial possibilita o uso da estatística clássica para descrever o fenômeno. Entretanto, Souza et al. (2008) advertem que isso nem sempre acontece, podendo acarretar sérios prejuízos econômicos e/ou ambientais seja por aplicação excessiva ou insuficiente de determinado fertilizante ou corretivo.

Em contrapartida, a amostragem sistemática de solo é uma alternativa que visa sanar essa limitação da amostragem convencional. Apesar de ter custo inicial mais elevado devido ao número de amostras necessárias, a amostragem sistemática de solo permite, por meio da identificação da variabilidade espacial das propriedades químicas do solo, recomendar aplicações de insumos em taxas variáveis, o que possibilita maior economia final quanto ao uso de nutrientes e redução da poluição ambiental, acarretada por doses excessivas e desnecessárias (OLIVEIRA et al., 2008; SOUZA et al., 2008;

CAVALCANTE et al., 2011; NEVES NETO et al., 2013).

Objetivou-se analisar a variabilidade espacial de atributos químicos de solo sob pastagem e suas recomendações de calagem e adubação necessárias com base na interpretação das análises químicas de amostras de solo provenientes de dois métodos de amostragem: convencional e sistemática.

2 Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido em uma área de pastagem (1,5 ha) cultivada há 8 anos com “Capim marundum” (*Brachiaria brizantha*), em substituição à pastagem nativa de “Capim pernambuco” (*Paspalum maritimum*), pertencente ao Setor de Bovinocultura do Instituto Federal do Espírito Santo, *campus* de Alegre, ES, Brasil, localizado nas coordenadas 20°45’52” S e 41°27’25” W e 132 m de altitude.

A região apresenta duas estações bem definidas, seca e chuvosa, com a maior precipitação média de 242,2 mm em dezembro, e o menor valor médio de 26,7 mm em junho (LIMA et al., 2008). Segundo a classificação internacional de Köppen, o clima é do tipo Cwa, (verão quente úmido e inverno seco), com temperatura média anual de 23,1 °C e precipitação média anual de 1.341 mm.

O solo do local do experimento é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo e o relevo forte ondulado, com declives de 20 a 45%, conforme classificação da Empresa Brasileira de Pesquisa em Agropecuária (EMBRAPA, 1979).

A metodologia envolveu dois métodos de amostragens: convencional e sistemática (Figura 1). O método convencional foi caracterizado por amostras do tipo composta obtidas por meio da coleta, em caminhamento zigue-zague, de 20 subamostras simples. Já o método de amostragem sistemática compreendeu amostras de solo georreferenciadas, realizadas em 32 pontos de coordenadas geográficas conhecidas. Nestes dois métodos foram exploradas duas profundidades do solo: 0 a 10 cm e 10 a 20 cm, totalizando 66 amostras.

O georreferenciamento das amostras foi realizado por meio da implantação prévia de 32 pontos, materializados por piquetes de madeira (0,20x0,03x0,03m) e georreferenciados pelo método de posicionamento *Real Time Kinematic* (RTK), obedecendo uma formatação regular de malha de 20x20 m. Para esta etapa foram utilizados dois receptores GNSS, marca *Ashtech™*, modelo *ProMark™500*, desenvolvidos para rastrear até 75 canais (GPS L1 C/A L1/L2 código P, L2C, portadora de comprimento de onda completa L1/L2; GLONASS I1 C/A, L2 C/A e código, portadora de comprimento de onda completa L1/L2; e SBAS: Código e portadora WAAS/EGNOS/MSAS), com acurácia de 10 mm ± 1 ppm, máscara de elevação de 15° e intervalo amostral de 1 segundo.

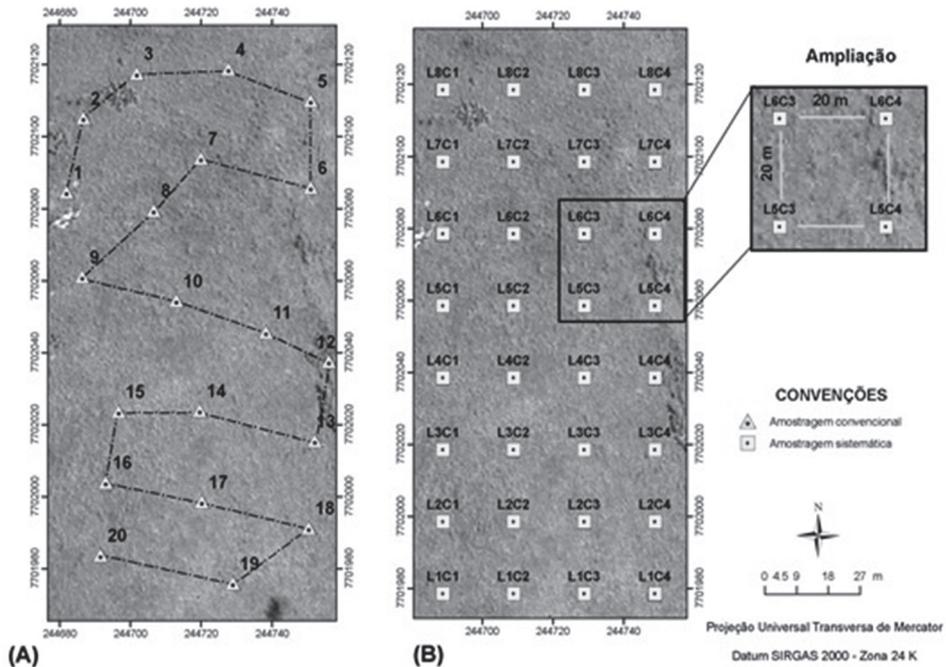


Figura 1 - Métodos de amostragens de solo realizadas: (A) convencional e (B) sistemática

Todas as amostras de solo foram retiradas no dia 03 de abril de 2013 e enviadas para o Laboratório de Análises Físicas e Químicas de Solo, visando à determinação química da acidez ativa (pH em água) e dos teores de alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), matéria orgânica (MO) e acidez potencial (H+Al).

A análise da variabilidade espacial dos dados foi realizada por meio da estatística descritiva e da geoestatística, sendo o *software* GS+ (ROBERTSON, 2000) utilizado para este fim.

A escolha dos modelos teóricos (esférico, exponencial, gaussiano, linear, sem patamar e efeito pepita puro) seguiu critérios adotados pelo *software* GS+, que utiliza a menor Soma dos Quadrados do Resíduo (SQR) e o maior coeficiente de determinação (R²).

O ajuste dos dados gerado pelo *software* GS+, a partir dos semivariogramas, possibilitou definir os seguintes parâmetros: efeito pepita (C0), patamar (C0 + C), alcance (a) e o Índice de Dependência Espacial (IDE). O IDE foi calculado e analisado pela relação $C/[C0 + C]$, conforme estabelecidos por Cambardella et al. (1994) e Zimback (2001).

Conhecidos os semivariogramas das variáveis, interpolou-se pelo *Software* SURFER 8.3 por combinação linear os valores medidos nas posições 20x20 m, utilizando o método da Krigagem ordinária.

A análise comparativa de recomendações de calagem e adubação em função do método de amostragem foi feita apenas para aqueles atributos químicos de solo que

apresentaram dependência espacial e valor de alcance (A0) condizente com o tamanho da área experimental.

O cálculo da necessidade de calagem (NC) foi realizado pelo método da elevação da saturação por bases (PREZOTTI et al., 2007).

As determinações das doses de P e K foram feitas de modo a elevar o nível de P no solo para 15 mg dm⁻³ e de K para 105 mg dm⁻³, considerando a disponibilidade do elemento químico no solo, a exigência da forrageira (VILELA et al., 1998) e a textura do solo (36 a 60% de argila) (PREZOTTI et al., 2007).

Foram também realizadas e analisadas, para cada camada do solo, recomendações espacializadas das necessidades de calagem e adubação e mapas de calagem e adubação nas áreas que necessitam de maiores e menores quantidades que as recomendadas através da amostragem convencional.

3 Resultados e Discussão

As estatísticas descritivas dos atributos químicos resultantes das análises químicas de solo pelo método sistemático de amostragem são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas dos atributos químicos no método sistemático de amostragem de solo, nas profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm

Atributos	Profundidade (0-10 cm)							
	\bar{X}	Mediana	s	Valores		Coeficientes		
				Mín.	Máx.	CV	Cs	Ck
pH	6,17	6,20	0,24	5,59	6,74	3,89	-0,15	0,39
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,05	5,39	27,03
Ca (cmol _c dm ⁻³)	1,89	1,90	0,53	0,80	3,14	28,04	-0,07	-0,19
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,31	1,27	0,27	0,80	1,75	20,61	-0,02	-0,90
P (mg dm ⁻³)	2,86	2,20	1,95	1,10	9,50	68,18	2,07	3,57
K (mg dm ⁻³)	41,62	38,40	20,88	15,00	124,50	50,17	2,09	5,97
MO (dag kg ⁻¹)	2,89	2,88	0,63	1,57	4,11	21,80	0,10	-0,22
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,72	2,80	0,50	1,60	3,60	18,38	-0,15	-0,20
Atributos	Profundidade (10-20 cm)							
	\bar{X}	Mediana	s	Valores		Coeficientes		
				Mín.	Máx.	CV	Cs	Ck
pH	6,19	6,17	0,23	5,63	6,71	3,71	-0,13	-0,13
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,00	0,01	0,00	0,05	0,03	2,78	5,77
Ca (cmol _c dm ⁻³)	1,81	1,93	0,50	0,86	2,91	27,62	-0,02	-0,58
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,04	1,05	0,24	0,45	1,84	23,08	0,61	2,56
P (mg dm ⁻³)	1,85	1,80	0,56	0,60	3,10	30,27	0,47	0,50
K (mg dm ⁻³)	25,95	24,90	17,84	9,30	116,70	68,75	4,03	18,03
MO (dag kg ⁻¹)	2,05	2,25	0,43	1,02	2,70	20,97	-0,71	-0,31
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,72	2,80	0,46	1,80	4,00	16,91	0,34	0,48

\bar{X} = média; s = desvio padrão; Máx. = máximo; Mín. = mínimo; CV = Coeficiente de variação; Cs = Coeficiente de assimetria; Ck = Coeficiente de curtose.

Ao se comparar os valores médios dos atributos químicos obtidos nas duas

profundidades com os valores utilizados para a classificação da fertilidade do solo (PREZOTTI et al., 2007), verifica-se que, de forma geral, o solo da pastagem apresenta classificação média de fertilidade. Apenas os teores de P e K estão abaixo dos níveis médios desejados, com características da fertilidade do solo restritivas para o crescimento de plantas. Esses valores deveriam estar entre 10 a 20 mg dm⁻³ (média de 15 mg dm⁻³) para o fósforo e entre 60 a 150 mg dm⁻³ (média de 105 mg dm⁻³) para o potássio.

De acordo com a classificação sugerida por Pimentel Gomes (2009), os valores de pH e Al apresentaram coeficientes de variação baixo (<10%), H+Al apresentou coeficiente de variação médio (10 a 20%) e os demais atributos (P, K, Ca, Mg e MO) apresentaram coeficientes de variação altos (>20%), principalmente para os atributos P e K. Valores altos de coeficiente de variação nos atributos químicos do solo revelam grande variabilidade dos dados, sugerindo que esses atributos são potencialmente mais apropriados para serem manejados espacialmente que aqueles atributos uniformemente distribuídos, ou seja, o uso de valores médios com alta variabilidade para a utilização em tomada de decisões, quanto ao manejo químico do solo, pode induzir a erros de recomendação de fertilizantes e corretivos.

Os valores dos coeficientes de assimetria (Cs) e curtose (Ck) demonstram que os atributos químicos do solo apresentaram distribuições assimétricas. A maioria deles, porém, possuem valores de coeficientes baixos, e bem próximos a zero. Apesar disto, os valores da média e mediana de todos os atributos químicos estudados estão relativamente bem próximos, indicando que o conjunto de dados não apresentou assimetria muito acentuada, a não ser para os atributos K e Al, que apresentaram valores de coeficientes de assimetria e curtose positivos e altos, ou seja, com concentração dos valores acima do valor médio dessas variáveis. Segundo Cambardella et al. (1994), quando os valores da média e mediana são muito próximos, os dados apresentam ou se aproximam da distribuição normal.

Os modelos e parâmetros ajustados pela análise dos semivariogramas são mostrados na Tabela 2. Todos os modelos tiveram comportamento isotrópico, ou seja, a dependência espacial obtida segue o mesmo alcance e padrão para todas as posições, sem ser tendenciosa a alguma direção. O modelo esférico foi o que melhor se ajustou aos semivariogramas dos atributos do solo, à exceção do K cujo modelo foi o exponencial. Esses resultados concordam com os observados por várias pesquisas que indicam que o modelo esférico ocorre em maior frequência em relação aos outros modelos (SILVA NETO et al., 2011). Entretanto, Corrêa et al. (2009) encontraram que, na maioria das vezes, o ajuste do modelo mais comum é do tipo exponencial.

Tabela 2 - Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais para as os atributos químicos, nas profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm

		Profundidade (0-10 cm)					
Atributos	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A0 (m)	IDE	R ²	SQR
pH	Esférico	1310,00	0,06	66,80	0,81	0,79	1,5E-04
Al (cmol _c dm ⁻³)	Esférico	3,00	8,0E-05	47,30	0,63	0,04	6,2E-09
Ca (cmol _c dm ⁻³)	Esférico	16700,00	0,54	310,90	0,69	0,76	3,8E-03
Mg (cmol _c dm ⁻³)	Esférico	5180,00	0,13	310,90	0,59	0,80	1,2E-04
P (mg dm ⁻³)	Esférico	24000,00	6,35	104,07	0,62	0,72	0,52
K (mg dm ⁻³)	Exponencial	3410000,00	694,90	104,07	0,51	0,35	6589
MO (dag kg ⁻¹)	Esférico	26000,00	0,72	252,10	0,80	0,80	2,1E-03
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	Esférico	24835,00	0,25	104,07	0,00	0,00	5,2E-04
		Profundidade (10-20 cm)					
Atributos	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A0 (m)	IDE	R ²	SQR
pH	Esférico	5405,00	0,05	104,07	0,00	0,15	1,0E-04
Al (cmol _c dm ⁻³)	Esférico	21,00	2,1E-04	104,06	0,00	0,30	1,4E-09
Ca (cmol _c dm ⁻³)	Esférico	22570,00	0,45	290,50	0,50	0,40	2,0E-03
Mg (cmol _c dm ⁻³)	Esférico	4250,00	0,08	310,90	0,50	0,15	5,1E-04
P (mg dm ⁻³)	Esférico	30485,00	0,30	104,07	0,00	0,06	6,4E-03
K (mg dm ⁻³)	Exponencial	23300000,00	625,8	286,80	0,63	0,65	8053
MO (dag kg ⁻¹)	Esférico	11860,00	0,34	310,90	0,65	0,80	1,1E-03
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	Esférico	16090,00	0,32	281,70	0,50	0,60	1,8E-03

C0 = Efeito pepita; C0+C = Patamar; A0 = Alcance; IDE = Índice de dependência; R² = Coeficiente de determinação; e SQR = Soma dos quadrados dos resíduos.

Os resultados de IDE na análise geoestatística (Tabela 2) mostram que, na profundidade de 0 a 10 cm, à exceção do H+Al, todos os atributos químicos apresentam dependência espacial, de forte a moderada. Conforme critérios de classificação de Cambardella et al. (1994) e Zimback (2001), a dependência espacial é fraca quando o IDE é < 0,25; moderada (0,25 ≤ IDE < 0,75) e forte IDE ≥ 0,75. Na profundidade de 10 a 20 cm, a dependência espacial somente foi verificada nos atributos K, Ca, Mg, H+Al e MO, apresentando classificação moderada.

Os valores de alcance de dependência espacial (A0) variaram de 47,30 a 310,90 m. Valores de patamar (C0+C) acima dos correspondentes valores de A0 significam que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre os pares das amostras torna-se invariante com a distância. Desta forma, esse parâmetro pode ser útil na definição de práticas de amostragem, uma vez que distâncias menores que o alcance são correlacionadas umas às outras (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A distribuição espacial dos atributos pH, Al, Ca, Mg, P, K, MO e H+Al, em cada camada do solo, é mostrada na Figura 2 (profundidade de 0 a 10 cm) e na Figura 3 (profundidade de 10 a 20 cm). Tais mapas permitem evidenciar as regiões heterogêneas de comportamento químico dos atributos na pastagem, complementando a análise prévia realizada a partir de valores médios e ratificando a importância das técnicas geoestatísticas nos trabalhos de descrição e modelagem de padrões espaciais, através da semivariografia.

As informações mostradas nessas distribuições são muito úteis para entender a variabilidade dos atributos químicos do solo e para identificar áreas que necessitam de maiores ou menores cuidados. Em toda a área de pastagem estudada, os teores de P nas

duas profundidades do solo estão abaixo do ideal ($< 10 \text{ mg dm}^{-3}$). Quanto aos teores de Ca verifica-se nas duas profundidades que, apesar dos valores médios deste atributo atenderem a classificação de Prezotti et al. (2007) (1,5 a $4,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$), há cerca de 16,88% da pastagem, na profundidade de 0 a 10 cm, que possui teores abaixo da faixa ideal; e, na profundidade de 10 a 20 cm, a área equivalente de deficiência deste atributo chega a 11,91%.

No que se refere aos teores de K, ocorre variabilidade ao comportamento. Constata-se que, apesar do solo da pastagem apresentar regiões com valores de K entre 60 a 150 mg dm^{-3} , grande parte da pastagem (93%, na profundidade de 0 a 10 cm e 99,79, na profundidade de 10 a 20 cm) apresenta valores de K abaixo desta faixa ideal.

Os maiores teores de Al foram encontrados nas regiões de menor valor de pH e os valores de MO, na camada de 10 a 20 cm, foram abaixo daqueles encontrados na camada mais superficial em todas as amostras.

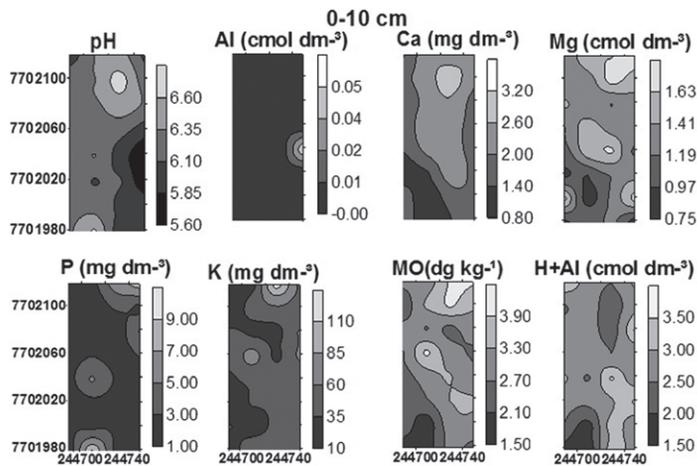


Figura 2 - Distribuição espacial dos atributos pH, Al, Ca, Mg, P, K, MO e H+Al, na profundidade 0-10 cm

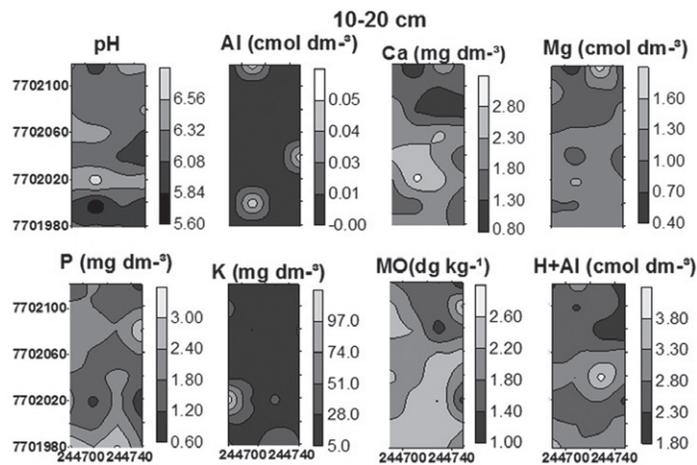


Figura 3 - Distribuição espacial dos atributos pH, Al, Ca, Mg, P, K, MO e H+Al, na profundidade 10-20 cm

Os resultados das análises químicas de solo pelo método de amostragem convencional revelaram os seguintes valores para a camada do solo de 0 a 10 cm: pH = 6,09; Al = 0,0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; Ca = 1,99 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; Mg = 1,03 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; P = 1,70 mg dm^{-3} ; K = 36,0 mg dm^{-3} ; MO = 2,22 dag kg^{-1} e H+Al = 2,60 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$. Para a camada de solo de 10 a 20 cm, os valores obtidos foram: pH = 6,01; Al = 0,0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; Ca = 1,87 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; Mg = 0,77 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; P = 1,80 mg dm^{-3} ; K = 15,0 mg dm^{-3} ; MO = 1,35 dag kg^{-1} e H+Al = 2,50 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$.

Em geral, as médias dos teores químicos avaliados no solo, reveladas pelo método convencional foram relativamente inferiores aos valores médios apresentados pelo método de amostragem sistemático (Tabela 1). Apenas os teores de Ca foram ligeiramente superiores: + 0,10 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ na profundidade de 0 a 10 cm e + 0,06 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ na profundidade de 10 a 20 cm.

Nas Figuras 4, 5 e 6 são apresentados os mapeamentos das necessidades de calagem e adubação de P (P_2O_5) e K (K_2O) para a pastagem nas profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm e os mapas das diferenças entre os dois métodos de recomendação de calagem e adubação, com valores maiores e menores que a observada na amostragem convencional. Nos mapas das necessidades de calagem e adubação maiores e menores que a observada na amostragem convencional, a cor clara corresponde às áreas em excesso e a cor escura às áreas em *deficit*, devidamente acompanhadas das porcentagens das áreas com excesso e *deficit* de cada atributo.

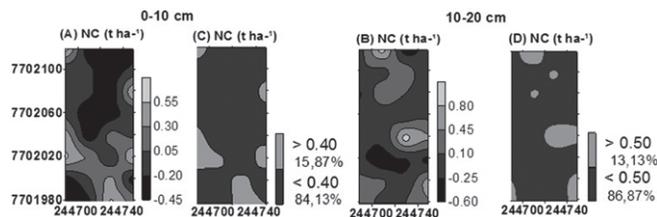


Figura 4 - Mapas das recomendações espacializadas das necessidades de calagem para a pastagem nas profundidades de 0 a 10 cm (A) e 10 a 20 cm (B) e mapas das necessidades de calagem maiores e menores que a observada na amostragem convencional, na profundidade de 0 a 10 cm (C), na profundidade 10 a 20 cm (D)

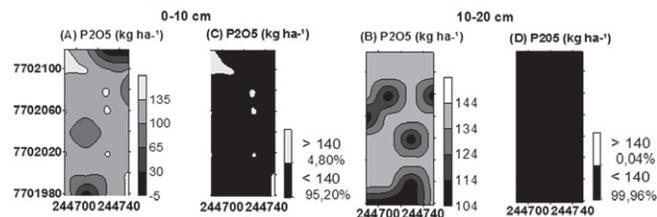


Figura 5 - Mapas das recomendações espacializadas das estimativas de P_2O_5 para a pastagem, nas profundidades de 0 a 10 cm (A) e 10 a 20 cm (B) e mapas das necessidades de adubação de P_2O_5 maiores e menores que a observada na amostragem convencional, na profundidade de 0 a 10 cm (C) e 10 a 20 cm (D)

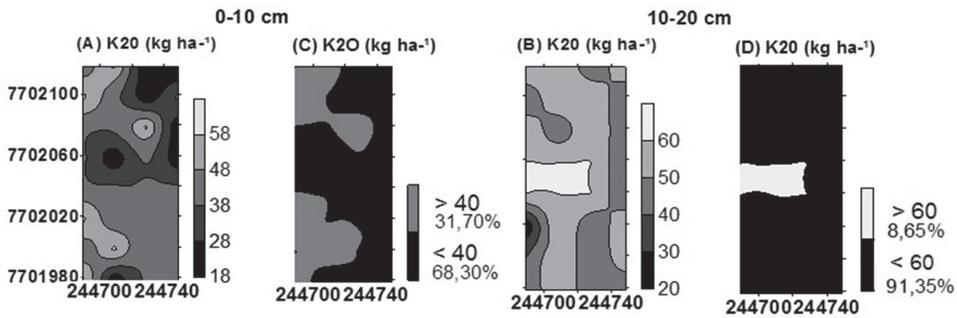


Figura 6 - Mapas das recomendações espacializadas das estimativas de K_2O para a pastagem, nas profundidades de 0 a 10 cm (A) e 10 a 20 cm (B) e mapas das necessidades de adubação de K_2O maiores e menores que a observada na amostragem convencional, na profundidade de 0 a 10 cm (C) e 10 a 20 cm (D)

Os cálculos da necessidade de calagem (NC), realizados pelo método de elevação da saturação por bases (PREZOTTI et al., 2007) para o método de amostragem convencional, recomendam $0,4 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário para a camada de 0 a 10 cm, e $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ para a camada de 10 a 20 cm. Vale destacar que em geral dose de calcário abaixo de $1,0 \text{ t ha}^{-1}$ não tem sua aplicação recomendada. As recomendações de adubação de P_2O_5 e K_2O para o método convencional foram de 140 kg ha^{-1} de P_2O_5 e de 40 kg ha^{-1} de K_2O (profundidade de 0 a 10 cm) e de 140 kg ha^{-1} P_2O_5 e de 60 kg ha^{-1} K_2O (profundidade de 10 a 20 cm), respectivamente (PREZOTTI et al., 2007).

Ao comparar os resultados de recomendação de calagem obtidos pelos dois métodos verifica-se que a aplicação de calcário pelo método de amostragem convencional ($0,4 \text{ t ha}^{-1}$ e $0,50 \text{ t ha}^{-1}$) proporciona adições desnecessárias de calcário em, aproximadamente, 84,13% e 86,87% para as camadas de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm, respectivamente, e insuficientes em 15,87% (camada de 0 a 10 cm) e 13,13% (camada de 10 a 20 cm).

Nas recomendações de P_2O_5 esses percentuais são ainda maiores, cerca de 95,20% da área referente à camada de 0 a 10 e 99,96% para a camada de 10 a 20 cm necessitam de adições de P_2O_5 , abaixo do padrão (recomendação pelo método convencional = 140 kg ha^{-1}). Já as recomendações de K_2O pelos valores médios revelados pela amostragem convencional resultariam na aplicação subdimensionada de K_2O em 31,70% da área (camada de 0 a 10 cm) e 8,65% (camada de 10 a 20 cm), e aplicações excessivas de K_2O em 68,30% (camada de 0 a 10 cm) e 91,35% (camada de 10 a 20 cm).

Esses resultados de recomendação de aplicação de corretivos e fertilizantes utilizando taxas variáveis, em regiões específicas no solo, em função do método de amostragem estão de acordo com os trabalhos de Oliveira et al. (2008) e Silva et al. (2010). Tais resultados corroboram o uso de zonas de manejo, princípio da agricultura de precisão, como estratégia válida para aumentar a eficiência do uso dos recursos naturais e reduzir o impacto da agricultura no ambiente. Todavia, a

aplicação das zonas de manejo, como esclarecem Luchiari Junior et al. (2011), deve levar também em consideração aspectos físicos do solo, que limitam a produtividade potencial dos solos, como a densidade e compactação, os quais são fatores limitantes ao crescimento radicular, restringem a disponibilidade de água e consequentemente a absorção e uso eficiente de nutrientes.

4 Considerações finais

A análise dos dados pelo método espacial possibilitou identificar zonas de *deficit* e excesso de recomendação da calagem e da adubação na área, que não poderiam ser definidas com o método convencional de amostragem.

Na profundidade de 0 a 10 cm, com exceção do H+Al, todos os atributos químicos apresentam dependência espacial, de forte a moderada, com alcances de 47,30 a 310,90 m. Na profundidade de 10 a 20 cm, a dependência espacial somente se verifica nos atributos Ca, Mg, K, MO e H+Al, apresentando classificação moderada, com alcances de 104,06 a 310,90 m.

A adubação fosfática, a adubação potássica e a necessidade de calagem a taxas variáveis são ferramentas importantes no melhoramento da fertilidade do solo em pastagens, aliadas à otimização de corretivos e fertilizantes, recursos naturais finitos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal do Espírito Santo *campus* de Alegre o suporte financeiro para a realização das análises químicas laboratoriais.

Referências

- AQUINO, R. E. et al. Distribuição espacial de atributos químicos do solo em área de pastagem e floresta. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 44, n. 1, p. 32-41, 2014.
- BERNARDI, A. C. C. (Org.) et al. *Agricultura de Precisão: um novo olhar*. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011, v. 1, p. 60-64.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, p. 237-243, 2011.
- CORRÊA, A. N.; TAVARES, M. H. F.; URIBE-OPAZO, M. A. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e seus efeitos sobre a produtividade do trigo.

Semina: Ciências Agrárias, v. 30, n. 1, p. 81-94, 2009.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10., 1979, Rio de Janeiro. *Súmula...* Rio de Janeiro, SNLC, 1979. 83 p. (SNLC. Série Miscelânea, 1).

GREGO, C. R. et al. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, n. 9, p. 1404, 2012.

GUARÇONI, M. A. et al. Definição da dimensão do indivíduo solo e determinação do número de amostras simples necessário à sua representação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, p. 943-954, 2006.

LIMA, J. S. S. et al. Variabilidade temporal da precipitação mensal em Alegre - ES. *Revista Ciência Agronômica*, v. 39, n. 2, p. 327-332, 2008.

LIMA, R. P.; SILVA, A. R.; RAMINELLI, J. A. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo por análise de agrupamento de pontos amostrais. *Revista Agrarian*, v. 7, n. 23, p. 82-88, 2014.

NEVES NETO, D. N. et al. Análise espacial de atributos do solo e cobertura vegetal em diferentes condições de pastagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 9, p. 995-1004, 2013.

OLIVEIRA, R. B. et al. Comparação entre métodos de amostragem do solo para recomendação de calagem e adubação do cafeeiro conilon. *Engenharia Agrícola*, v. 28, n. 1, p. 176-186, 2008.

PIMENTEL GOMES, F. *Curso de estatística experimental*. 15. ed. Piracicaba, SP: FEALQ, 2009, 451 p.

PLANO Estratégico de Desenvolvimento da Agricultura Capixaba. Disponível em: <<http://www.incaper.es.gov.br>>. Acesso em: 11 mar. 2014.

PREZOTTI, L. C. et al. *Manual de recomendação de calagem e adubação para o estado do Espírito Santo*: 5ª aproximação. Vitória: SEEA/INCAPER/CEDAGRO, 2007. 305 p.

REZENDE, P. L. P. et al. Desempenho e desenvolvimento corporal de bovinos leiteiros mestiços submetidos a níveis de suplementação em pastagem de *Brachiaria brizantha*. *Ciência Rural*, v. 41, n. 8, p. 1453-1458, 2011.

ROBERTSON, G. P. *Geoestatistic for the enviroment sciences: user's guide*. Phainwell: GS+, Gamma Design Software, 2000. 152 p.

SILVA, S. A. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo vermelho-amarelo húmico cultivado com café. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 15-22, 2010.

SILVA NETO, S. P. et al. Análise espacial de parâmetros da fertilidade do solo em região de ecótono sob diferentes usos e manejos. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 32, n. 2, p. 541-552, 2011.

SOUZA, G. S.; LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A. Variabilidade espacial do fósforo, potássio e da necessidade de calagem numa área sob pastagem. *Revista Ciência Agronômica*, v. 39, n. 3, p. 384-391, 2008.

VILELA, L. et al. *Calagem e adubação para pastagem na região do cerrado: circular técnica nº 37*. Planaltina, DF: EMBRAPA, 1998. 16 p.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2013. 215 p.

ZIMBACK, C. R. L. *Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo*. 2001. Tese (Livre Docência), Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

Artigo recebido em: 8 dez. 2014

Aceito para publicação em: 24 abr. 2015