

UTILIZAÇÃO DE ANÁLISE MULTIVARIADA NA AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS GEOMORFOLÓGICOS E ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

Diego Lang Burak¹, Renato Ribeiro Passos², Solange de Alho Sarnaglia³

1. Bolsista Pós-Doutorado do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (dlburak@hotmail.com)
2. Professor Adjunto do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo
3. Graduandos em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo

RESUMO

O relevo tem um papel importante na gênese e no desenvolvimento de diferentes atributos físicos do solo. Diferentes formas geomorfológicas podem influenciar a dinâmica da água no solo, e, por conseguinte, os atributos associados a essa dinâmica. Por meio da parametrização geomorfológica e de análises estatísticas uni e multivariadas, objetivou-se melhor compreender a relação entre atributos físicos do solo nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade e as formas do relevo de um segmento da paisagem nos domínios morfoclimáticos de Mares de Morro, na região de Pacotuba no estado do Espírito Santo. A partir dos resultados, pôde-se observar uma relação entre o aumento do fluxo acumulado do escoamento superficial e maiores teores de areia grossa associados a maiores valores de macroporosidade e menores de microporosidade. Esse fato deve-se à maior perda de argila, mais facilmente transportada, e ao enriquecimento residual da areia grossa que ocorrem principalmente no terço inferior da área. Nos locais de menor declividade, menor fluxo acumulado do escoamento superficial e maior altitude, foram observados maiores valores de argila, de microporosidade e de resistência à penetração, sendo todos esses atributos condicionados pela maior estabilidade do terço superior da área, onde o transporte de partículas mais finas do solo é menor.

PALAVRAS-CHAVE: geomorfometria, propriedades físicas do solo, Análise de Componentes Principais.

USE OF MULTIVARIATE ANALYSIS IN THE EVALUATION OF GEOMORPHOMETRIC PARAMETERS AND SOIL PHYSICAL CHARACTERISTICS

ABSTRACT

The relief has an important role in soil physical attributes genesis and development. Different landforms can influence in the water dynamics and, consequently, in the attributes that are influenced by water dynamics. The objective of this study was to understand the relationship between physical attributes and landforms by geomorphometric and statistical analyses. The soil physical attributes at two depth (0-10 and 10-20 cm) was analyzed in a segment of relief in Pacotuba landscape,

Espírito Santo State. By the results, we found a relationship between the higher water flow accumulation and higher coarse sand contents associated to the higher macroporosity and smaller microporosity. This fact is due to largest clay loss and to residual enrichment in coarse sand that occurs mainly in the inferior part of study area. In areas with smaller slope and flow accumulation as in higher altitude we found higher microporosity and resistance to penetration. These later results were conditioned by the largest stability in the higher altitude areas where the transport of finer particles of the soil is smaller.

KEYWORDS: Geomorphometry, soil physical properties, Principal Components Analysis.

INTRODUÇÃO

A dinâmica da água em superfície e em subsuperfície condiciona o surgimento da variabilidade ao longo da paisagem dos atributos químicos, físicos, biológicos e mineralógicos no solo. Essa dinâmica é fortemente relacionada às formas do relevo que governam os processos de erosão ou deposição de sedimentos e nutrientes criando zonas mais homogêneas em relação às propriedades do solo em cada segmento da paisagem (DANIELS & HAMMER, 1992).

As diferentes formas do relevo e sua influência nos atributos do solo podem ser mais bem entendidas avaliando aspectos relacionados à geomorfologia como curvatura, fluxo acumulado do escoamento superficial, declividade e altitude. Segundo MARQUES JÚNIOR & LEPSCH (2000) a utilização da altitude, declividade e formas (côncavo ou convexo) do relevo são suficientes para delinear zonas mais homogêneas de manejo em diferentes segmentos da paisagem, importantes no manejo sustentável do solo e na otimização de práticas agronômicas.

Estudos estatísticos, geoestatísticos, assim como técnicas de geoprocessamento que relacionam as formas do relevo com atributos químicos e físicos do solo necessitam de parâmetros quantificáveis. Torna-se essencial, nesse sentido, a parametrização das feições geomorfológicas que pode ser entendida como uma descrição numérica contínua de uma superfície topográfica (WOOD, 2000). De acordo com BLASZCZYNSKI (1997), a quantificação das feições geomorfológicas da superfície da terra é essencial para a avaliação de processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na paisagem principalmente dentro das facilidades geradas pelos avanços atuais nos processos de análises de uma grande massa de informações. Nesse sentido, uma forma eficiente de análise de uma grande massa de informações seria utilizando a estatística multivariada, que permite estudar as inter-relações entre diversas variáveis ou entre conjuntos de variáveis. Considerando muitas variáveis simultaneamente, torna-se possível obter informações e interpretações que poderiam não ser perceptíveis com o uso da análise estatística univariada (CRUZ & REGAZZI, 2001).

OBJETIVO

Partindo da premissa de que a geomorfologia condiciona variabilidade dos atributos físicos dentro de um segmento da paisagem com mesma classe de solo e condições climáticas, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a relação entre parâmetros geomorfológicos e atributos físicos do solo por meio da estatística uni e multivariada.

METODOLOGIA

A área de estudo localiza-se na Fazenda Experimental Bananal do Norte, pertencente ao Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), localizada no distrito de Pacotuba, município de Cachoeiro de Itapemirim, sul do estado do Espírito Santo. A área tem um total de 0,6 ha e está localizada nas coordenadas geográficas: 20° 45' 17,31" de Latitude Sul e 41° 17' 8,86" de Longitude Oeste de Greenwich com altitude média de 113 metros.

A Fazenda Experimental Bananal do Norte está inserida dentro do domínio morfoclimático de Mares de Morro segundo AB'SABER (1977) sobre um embasamento geológico de granito-gnaiss. O solo representativo da região foi classificado com Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura argilosa. Foram coletados 104 pontos georreferenciados nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm totalizando 208 amostras. A área encontra-se sob lavoura de café da espécie *Coffea canephora* Pierre, var. Robusta Tropical – 'Emcaper 8151', implantada em 1999, sendo o manejo realizado sem maquinário agrícola.

Para melhor visualização das formas do relevo na área foram avaliados a declividade, o fluxo acumulado do escoamento superficial e o Modelo Digital de Elevação (MDE) (Figura 1). O MDE foi produzido a partir de curvas de nível com intervalo de 1 metro. A interpolação das curvas de nível foi feita em uma estrutura de grade triangular, formando um MDE de formato TIN (Triangulated Irregular Network), sendo todo o procedimento realizado no programa ArcGIS 9.0 (ESRI, 2001) com a ferramenta *3D Analyst*. Posteriormente o MDE, foi transformado para o formato raster, com tamanho de células (ou pixels) de 2 metros (Figura 1a).

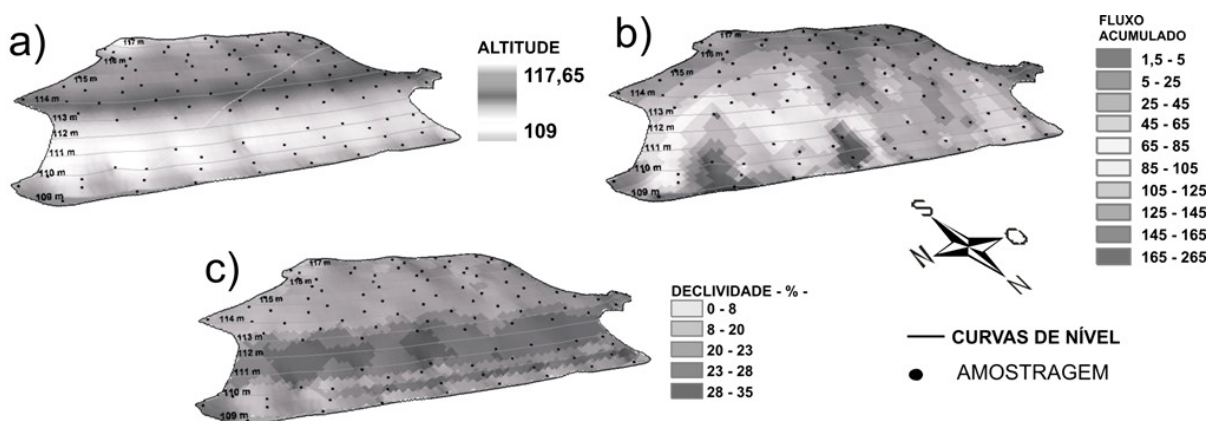


FIGURA 1. Modelo Digital de Elevação (a), Fluxo acumulado do escoamento superficial da área de estudo (b) e Declividade (c).

A partir do MDE raster foram extraídos os planos de informação da declividade em percentagem (Figura 1c) e do fluxo acumulado do escoamento superficial (Figura 1b). Planos de informação da curvatura do terreno (côncavo-côncavo, convexo-convexo, côncavo-convexo ou convexo-côncavo), não foram utilizados por apresentarem pequena variação dos seus valores na área.

A partir do MDE, foi gerado um plano de informação da direção de fluxo, a partir da qual se pôde obter o fluxo acumulado do escoamento superficial (Figura 1c). Neste plano de informação, as células (pixels representativos de parcelas de 2 x 2 m na área) correspondentes ao fluxo acumulado são geradas a partir dos vetores

da direção de fluxo de modo que o valor referente a uma célula dependerá da convergência dos vetores da direção de fluxo das células circunvizinhas. Caso todas as células circunvizinhas apresentem vetores direcionados para uma mesma célula, um valor elevado de fluxo acumulado será obtido nesta célula. Maiores informações deste método de derivação de escoamento superficial acumulado a partir de um modelo digital de elevação são apresentadas por JENSON & DOMINGUE (1988). Depois de obtido os planos de informações, foram obtidos os valores desses planos atribuídos às células que estiveram associados a cada ponto amostral, obtendo-se os valores dos parâmetros geomorfológicos em cada ponto amostral.

Os atributos físicos do solo avaliados em cada ponto georreferenciado nas duas profundidades (0-10 e 10-20 cm) foram: densidade de partículas, areia grossa, argila, relação areia grossa/argila, relação silte/argila, resistência à penetração, densidade do solo, porosidade total, microporosidade e macroporosidade. A densidade de partículas foi obtida pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997). Os teores de areia grossa, silte e argila foram determinados conforme EMBRAPA (1997) com modificações. A resistência do solo à penetração foi avaliada com a utilização de penetrômetro de impacto (STOLF, 1991), sendo a calibração do penetrômetro feita conforme a fórmula proposta pelos holandeses e descrita por STOLF (1991). Para avaliação da densidade do solo, foram utilizadas amostras indeformadas retiradas em anéis de aço de bordas cortantes (EMBRAPA, 1997) que foram introduzidos no solo com auxílio de um amostrador tipo Uhland. A porosidade total, ou seja, o volume de vazios totais do solo que pode estar ocupado por água e/ou ar, foi obtido indiretamente por meio da relação existente entre a densidade do solo e a densidade de partículas de acordo com EMBRAPA (1997). A macro e a microporosidade foram determinadas em uma panela de tensão, onde amostras saturadas foram submetidas a uma sucção de seis Kpa para retirada da água correspondente à macroporosidade.

Com os resultados das análises físicas e dos valores correspondentes aos parâmetros geomorfológicos foram feitas análises descritivas (média, mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação). Avaliou-se a diferença dos valores dos atributos entre a camada de 0-10 e 10-20 cm pelo teste t para amostras relacionadas (RIBEIRO JUNIOR, 2001). Esse teste foi efetuado após a transformação logarítmica dos dados para aqueles que não apresentaram distribuição normal. O teste t para amostras relacionadas é baseado na hipótese H_0 de que a diferença média é igual a zero, e na hipótese H_1 , de que a diferença média entre amostras é diferente de zero (RIBEIRO JUNIOR, 2001). Foram feitas também análises de correlação de Pearson e Análises de Componentes Principais (ACP). Nessa análise, fatores principais (componentes principais) que respondem pela maior parte da variabilidade de todas as variáveis são identificados, decompondo-se a matriz de correlação ou covariância (CRUZ & REGAZZI, 2001). No presente estudo foi utilizada a matriz de correlação, uma vez que os atributos físicos apresentam diferentes unidades. Na ACP, pode-se ainda identificar as amostras relacionadas aos fatores principais pelos gráficos de escores.

RESULTADOS

Maiores teores de areia grossa foram encontrados na camada de 0-10 cm e maiores teores de argila na camada de 10-20 cm segundo o teste t (significativo a 5 % de probabilidade) indicando que existe uma diferença significativa entre as

camadas do solo. Na camada de 0-10 cm foram encontradas maiores relações areia grossa/argila e silte/argila. Na camada de 10-20 cm os valores médios da resistência à penetração foram significativamente mais elevados em comparação à camada de 0-10 cm pelo teste t. Pode-se destacar que a partir desses valores os solos podem ser classificados, segundo USDA (1993), como de alta resistência à penetração na camada de 0-10 cm e muito alta na camada de 10-20 cm. Os demais atributos físicos apresentaram valores médios próximos. Os valores médios dos parâmetros geomorfológicos altitude, fluxo acumulado e declividade foram de 113,41 m, 47,12 e 16,12 %, respectivamente (Tabela 1).

A avaliação da variabilidade dos dados, medida pelo coeficiente de variação (CV) foi baseada nos limites propostos por WARRICK & NIELSEN (1980), para classificação de atributos do solo, que consideram: variabilidade baixa (CV < 12%); média (12% < CV < 60%) e alta (CV > 60%). A variabilidade é decorrente a diferentes processos como manejo, erosão e natureza da variável estudada. Dentre os atributos analisados no solo, a densidade de partículas, densidade do solo, porosidade total e microporosidade apresentaram variabilidade baixa. Areia grossa, argila, macroporosidade e resistência à penetração apresentaram variabilidade média.

TABELA 1. Análise descritiva (média, valor mínimo, valor máximo e desvio padrão) dos atributos físicos do solo e dos parâmetros geomorfológicos e o test $t^{(1)}$.

Variáveis	Camada de 0-10 cm					Camada de 10-20 cm				
	MED	MIN	MAX	DP	CV (%)	MED	MIN	MAX	DP	CV (%)
Densidade de Partículas (kg/dm ³)	2,61 a	2,35	3,03	0,11	4,2	2,65 a	2,38	3,03	0,15	5,7
Areia Grossa (%)	32,17 a	21,58	43,63	4,45	13,8	29,80 b	12,14	40,80	4,93	16,5
Argila (%)	49,80 a	18,35	60,01	6,54	13,1	52,51 b	30,36	73,36	6,80	12,9
Resistência à penetração (Mpa)	4,60 a	2,58	7,31	1,08	23,5	10,78 b	6,63	16,09	2,33	21,6
Densidade do Solo (kg/dm ³)	1,28 a	1,13	1,40	0,05	3,9	1,27 a	1,03	1,58	0,07	5,5
Porosidade Total (% v-v)	50,97 a	43,97	57,25	2,91	5,7	51,67 a	40,61	63,30	3,76	7,3
Microporosidade (% -v-v)	26,08 a	17,62	35,64	2,32	8,9	26,27 a	14,66	36,08	2,75	10,5
Macroporosidade (% -v/v)	25,64 a	16,38	55,73	5,75	22,4	25,95 a	15,57	49,94	5,56	21,4
Relação Areia Grossa/Argila	0,67	0,36	1,71	0,21	31,3	0,58	0,22	0,98	0,15	25,9
Relação Silte/Argila	0,15	0,01	2,13	0,28	186,7	0,12	0,01	0,88	0,13	108,3
Altitude (m)	113,41	108,66	117,69	2,65	2,3	113,41	108,66	117,69	2,65	2,3
Fluxo Acumulado	47,12	0,00	562,00	73,54	156,1	47,12	0,00	562,00	73,54	156,1
Declividade (%)	16,12	1,13	31,32	6,60	40,9	16,12	1,13	31,32	6,60	40,9

⁽¹⁾ médias seguidas pela mesma letra não apresentam diferença significativa a 5% de probabilidade pelo teste t de amostras relacionadas

Com os resultados das correlações de Pearson entre atributos físicos e parâmetros geomorfológicos na camada de 0-10 cm, pode-se observar que maiores altitudes estão relacionadas com menores teores de areia grossa, menores relações areia grossa/argila e menor macroporosidade. As maiores altitudes estão relacionadas com maiores teores de argila. Uma tendência semelhante foi observada para a camada 10-20 cm indicando que em maiores altitudes são encontrados menores teores de areia grossa e maiores teores de argila.

Foram encontradas correlações positivas e significativas do fluxo acumulado do escoamento superficial com areia grossa, relação areia grossa/argila e macro porosidade. Por outro lado, correlações negativas foram encontradas entre fluxo acumulado e microporosidade na camada de 0-10 cm. A partir desses resultados,

pôde-se inferir que o fluxo acumulado do escoamento superficial condiciona o aumento dos teores de areia grossa, que por sua vez aumenta a macroporosidade do solo. A declividade apresentou correlações positivas com a porosidade total e a macroporosidade somente na camada de 10-20 cm.

TABELA 2. Análises de correlações de Pearson⁽¹⁾ das variáveis estudadas⁽²⁾

Camada de 0-10 cm										
	Dp	ArGr	Ar	ArGr/Ar	Si/Arg	ResPen	DenSolo	PorTotal	MicroPor	MacroPor
ALTITUDE	-0,13	-0,48**	0,29*	-0,31**	0,07	-0,01	0,15	-0,20	0,10	-0,23*
FLUXO	0,18	0,35**	-0,17	0,22*	-0,08	-0,02	0,06	0,07	-0,24*	0,21*
DECLIVIDADE	0,08	0,13	-0,03	0,03	-0,07	0,11	-0,14	0,16	0,04	0,11
Camada de 10-20 cm										
	Dp	ArGr	Ar	ArGr/Ar	Si/Arg	ResPen	DenSolo	PorTotal	MicroPor	MacroPor
ALTITUDE	0,04	-0,31**	0,39**	-0,36**	-0,09	0,11	0,12	-0,04	0,04	-0,06
FLUXO	0,18	0,14	-0,15	0,15	-0,04	-0,12	-0,01	0,14	-0,15	0,19
DECLIVIDADE	0,10	0,13	-0,06	0,08	-0,12	0,08	-0,29*	0,26*	-0,07	0,24*

⁽¹⁾ * significativo a 1% de probabilidade, ** significativo a 5% de probabilidade.

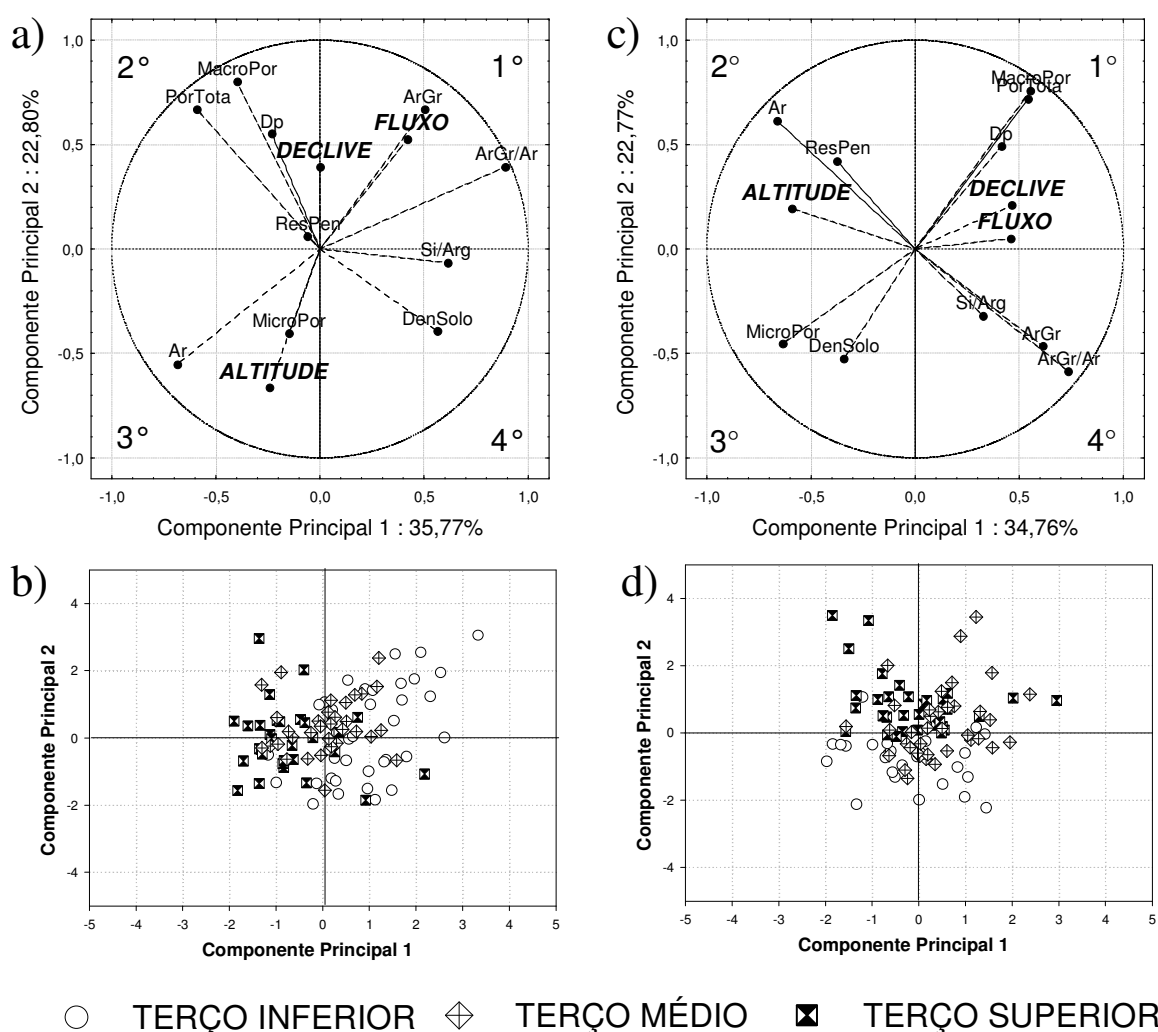
⁽²⁾ Dp = densidade de partículas; ArGr = areia grossa; Ar = argila; ArGr/Ar = relação areia grossa/argila; Si/Arg = relação silte/argila; ResPen = resistência a penetração; DenSolo = densidade do solo; PorTotal = porosidade total; MicroPor = microporosidade; MacroPor = macroporosidade.

Para a melhor avaliação das relações entre os atributos estudados e os grupos de amostras coletadas responsáveis por essa relação, foi realizada a Análise de Componentes Principais (ACP) (Figura 2). Para melhor interpretação do relevo, os escores das amostras (Figura 2b e 2d) foram subdivididas em grupos em relação a sua posição na vertente: terço inferior (amostras entre 109 e 112 metros), terço médio (amostras entre 112 e 115 metros) e terço superior (amostras entre 115 e 118 metros). Foram utilizados os dois primeiros Componentes Principais, que explicaram, juntamente, 58,57 % da variação total dos dados. A ACP permite identificar os Componentes Principais responsáveis pela variação total dos dados e os grupos de variáveis explicativas dessas variações. Dessa forma as variáveis em um mesmo quadrante (1°, 2°, 3° e 4°) e mais próximas no gráfico de dispersão da ACP são mais bem correlacionadas. Da mesma forma, escores atribuídos às amostras que se encontram próximos e em um mesmo quadrante (Figura 2b e 2d), estão relacionadas com as variáveis daquele quadrante no gráfico de dispersão da ACP (Figura 2a e 2c).

Os resultados da ACP nas camadas de 0-10 cm indicam que as variáveis o fluxo acumulado do escoamento superficial, o teor de areia grossa e a relação areia grossa/argila ocorrem mais próximas e com correlações positivas com o Primeiro e Segundo Componente Principal (primeiro quadrante do gráfico). No sentido oposto, no terceiro quadrante, observam-se as variáveis altitude, argila e microporosidade com correlações negativas com a Componente Principal 1 (CP1) e Componente Principal 2 (CP2), indicando uma relação negativa dessas variáveis com o fluxo acumulado do escoamento superficial, teor de areia grossa e a relação areia grossa/argila.

Observa-se, a partir do gráfico de escores das amostras (Figura 2b), que aquelas coletadas no terço inferior da área tiveram maior contribuição para o grupo das variáveis fluxo acumulado, areia grossa e relação areia grossa/argila. Já a maioria das amostras do terço superior contribuiu para o grupo das variáveis argila, microporosidade e altitude. Pode-se destacar que as variáveis macroporosidade e porosidade total na camada de 0-10 cm, correlacionadas positivamente com a CP2, estiveram mais próximas da variável declive e areia grossa.

Na camada de 10 a 20 cm, os dois primeiros Componentes Principais contribuíram com 57,53% da variação total dos dados. Destaca-se a forte relação entre macroporosidade, porosidade total e densidade de partículas, que são correlacionadas positivamente com o CP1 e CP2, juntamente com a variável declive (mais próximo do grupo de variáveis macroporosidade, porosidade total e densidade de partículas). As amostras que mais contribuíram para esse grupo de variáveis (macroporosidade, porosidade total, densidade de partículas e declividade) foram aquelas localizadas no terço médio da encosta. Podem-se destacar as variáveis altitude, resistência a penetração e argila no segundo quadrante que apresentaram correlação negativa com a CP1 e positiva com CP2. As amostras no terço superior da encosta foram as que mais contribuíram com esse grupo de variáveis (altitude, resistência à penetração e argila).



Dp = densidade de partículas; ArGr = areia grossa; Ar = argila; ArGr/Ar = relação areia grossa/argila; Si/Arg = relação silte/argila; ResPen = resistência a penetração; DenSolo = densidade do solo; PorTotal = porosidade total; MicroPor = microporosidade; MacroPor = macroporosidade

FIGURA 2. Gráfico dos componentes principais e suas respectivas correlações com as variáveis estudadas nas profundidades de 0-10 (a) e 10-20 cm (b), mostrando os quadrantes (1°, 2°, 3° e 4°). Gráficos dos escores

das amostras utilizadas nas profundidades de 0-10 (b) e 10-20 cm (d), identificando sua localização na área de estudo (segmento do terço superior, terço médio e terço inferior).

DISCUSSÃO

Dentro da área estudada, relativamente pequena em extensão (0,6 ha) pôde-se observar uma variabilidade dos atributos físicos do solo dentro dos segmentos separados na paisagem (terço inferior, terço médio e terço superior) condicionada pelo relevo. A variação de declividade, altitude e fluxo acumulado do escoamento superficial foram suficientes para gerar uma amplitude de 4,2 a 186% do coeficiente de variação dos atributos estudados. SOUZA et al. (2004), trabalhando com os atributos físicos do solo verificaram que as formas do relevo influenciam de forma diferenciada os diferentes atributos estudados como observado pela menor variação para a densidade do solo e uma alta variação para a resistência à penetração, semelhante ao encontrado no presente trabalho. Os autores concluem que zonas mais homogêneas nos segmentos da paisagem devem ser avaliadas para a otimização do manejo dos solos. Dentro dessa premissa, EFFGEN (2006) verificou que em condições de relevo forte ondulado (20 a 45 % de declividade), faz-se necessária a divisão das áreas em segmentos (terço superior, médio e inferior) para o manejo do solo objetivando o cultivo com café por apresentarem tais segmentos uma capacidade produtiva diferenciada.

Pelos resultados observados, o maior fluxo acumulado do escoamento superficial favorece a presença da areia grossa na camada de 0-10 cm, devido ao seu enriquecimento residual, uma vez que partículas finas do tamanho de argila são mais facilmente dispersas e transportadas nas partes onde esse fluxo acumulado é maior. O maior tamanho da fração areia grossa não favorece seu transporte a grandes distâncias, ao contrário da argila, que é transportado mais facilmente pelo escoamento superficial da água. Como consequência disto, nos locais com maiores teores de areia grossa ocorrem os menores valores de microporosidade e de argila. MEDINA & GROHMANN (1966) encontraram uma relação direta entre maior macroporosidade e maiores teores de areia, assim como maior microporosidade e maiores teores de argila. Isto posto, pode-se sugerir um efeito de aumento do volume de água pelo fluxo acumulado como principal agente condicionante de zonas com solos com maior teor de areia e com maior macroporosidade no terço inferior da área na camada 0-10 cm. Ademais, a perda de partículas mais finas do solo com tamanho das frações silte e argila, assim como a matéria orgânica durante a o escoamento superficial, resultam na perda de nutrientes (WALTON et al. 2000).

No terço superior da paisagem na camada de 0-10 cm onde ocorrem menores valores de declividade e de fluxo acumulado do escoamento superficial (Figura 1), as amostras coletadas apresentam maior associação entre maiores teores de argila e microporosidade. Nesse segmento ocorrem os menores valores de macroporosidade e areia grossa indicando que nesta área, devido a uma maior pedogênese em relação à morfogênese, é favorecido o aumento do teor de argila, que por sua vez contribui para o incremento da microporosidade do solo. Isto pode ocorrer principalmente em solos com característica mineralógica mais caulínicas como as que ocorrem nos solos da área de estudo (dados não apresentados). SILVA et al. (2007) encontraram uma relação positiva entre aumento da microporosidade, diminuição da porosidade total e aumento da densidade do solo em solos com maiores teores de caulinita. ARINGHIERI (2004) encontrou uma

relação linear entre microporosidade e conteúdo de argila, considerando argilas de maior superfície específica.

Foi observada uma relação entre maior declividade e maiores valores de macroporosidade, porosidade total e densidade de partículas na camada de 10-20 cm relacionada às amostras do terço médio da área, fato este observado em menor expressão na camada de 0-10 cm. Isto sugere que no terço médio a dinâmica da água atua retirando partículas mais finas e mais leves resultando em maiores valores de macroporosidade e densidade de partículas. Isto ocorre possivelmente não pelo seu volume do escoamento superficial, mas sim pela sua maior velocidade que está diretamente relacionada com a maior declividade. Escoamento superficial em menores declividades e com baixa velocidade tem, conseqüentemente, sua capacidade de transporte de partículas condicionada à vazão do escoamento superficial (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990).

A relação positiva da resistência à penetração e argila esteve relacionada a amostras do terço superior da área e na camada de 10-20 cm na qual a influência da matéria orgânica é menor. Os teores de matéria orgânica possuem um papel importante na agregação do solo, influenciando conseqüentemente a resistência à penetração. Segundo EKWUE & STONE (1995) trabalhando em condições laboratoriais, teores entre 17 e 27 g kg⁻¹ reduzem a resistência do solo a penetração em baixos conteúdos de umidade. Em contrapartida, RIBON e TAVARES FILHO (2004) encontraram uma relação positiva do teor de argila e da resistência à penetração, ou seja, maiores teores de argila aumentaram a resistência a penetração do solo. Os autores enfatizam que tais resultados podem ser diferenciados a depender da mineralogia, da umidade do solo e até mesmo da natureza da matéria orgânica.

O entendimento das relações entre atributos físicos e diferentes segmentos da paisagem tornam-se importantes para o manejo, uma vez que a retenção de água, aeração, adsorção de íons interferem no comportamento da cultura. Isto foi eficientemente realizado por meio de técnicas estatísticas multivariadas e pela avaliação de parâmetros geomorfológicos quantificáveis extraídos do MDE. O manejo do solo na área estudada deve ser diferenciado nos segmentos do terço inferior, médio e superior da paisagem para o melhor desempenho das culturas e um manejo sustentável do solo além de tornar os procedimentos de manejo como adubação e calagem mais precisos aumentando a eficiência de práticas agrônômicas.

CONCLUSÃO

Os parâmetros geomorfológicos da área estudada (altitude, declividade, fluxo acumulado do escoamento superficial) influenciaram na variabilidade dos atributos físicos do solo, de forma que os teores de areia grossa e os valores da macroporosidade foram maiores nas partes inferiores da paisagem, onde a erosão atua em maior intensidade que a pedogênese. Já nas partes mais estáveis, de menor declividade, menor fluxo acumulado do escoamento superficial, encontradas em maiores altitudes, os maiores teores de argila estiveram associados a maiores valores de microporosidade e de resistência a penetração.

AGRADECIMENTOS

À CAPES pelo auxílio financeiro e pela bolsa concedida junto ao Programa Nacional de Pós Doutorado/ PNPd.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A.N. **Os domínios morfoclimáticos na América do Sul**: primeira aproximação. Geomorfologia, v.52, p. 17-28, 1977.

ARINGHIERI, R. Nanoporosity characteristics of some natural clay minerals and soils. **Clays and Clay Minerals**, v.52, p.700-704, 2004.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, R. **Conservação do solo**. São Paulo:Ícone, 1990. 355p.

BLASZCZYNSKI, J. S. Landform characterization with geographic information Systems. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v.63, p.183-191, 1997.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, 2001. 390p.

DANIELS, R. B.; HAMMER, R. D. **Soil Geomorphology**. 1992 Ed. John Wiley & Sons. New York. 236 p.

EFFGEN, T. A. M. **Atributos do solo em função de tratos culturais em lavouras de cafeeiro conilon no sul do estado do Espírito Santo**. Alegre, Universidade Federal do Espírito Santo, 2006, 93 p. (Dissertação de Mestrado).

EKWUE, E. I. AND STONE, R. J. Organic matter effects on the strenght properties of compact agricultural soils. **Transections of the ASAE**, v.38, p. 357-365, 1995.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

ESRI. ArcGIS, GIS for Windows. **Environmental Systems Resarch Institute**. v 9.0. Redlands, CA., USA. 2001.

JENSON S. K.; J. O. DOMINGUE. **Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. v.54, n.11, p.1593-1600, 1988.

MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I. F. **Depósitos superficiais neocenozóicos, superficiais geomórficas e solos em Monte Alto, SP**. Geociências. v.19, p.265-281, 2000.

MEDINA, H.P.; GROHMANN, F. Disponibilidade de água em alguns solos sob cerrado. **Bragantia**, v.25, p.65-75, 1966.

RIBEIRO JUNIOR, J.I. **Análises estatísticas no SAEG**. Viçosa, UFV, 2001. 301p.

RIBON, A.A.;TAVARES FILHO, J. Models for the estimation of the physical quality of a yellow red latosol (oxisol) under pasture. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.47, p. 25-31, 2004.

SILVA, A.J.N.;CARVALHO, F.G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um latossolo amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v.31, p.853-862, 2007.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.937-944, 2004.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.229-235, 1991.

USDA. **Soil survey manual**. Washington, DC, USA, Soil Survey Division Staff, 1993. 437p. (Handbook, 18).

WALTON, R.S.; VOLKER, R.E.; BRISTOW, K.L.; SMETTEM, K.R.J. Experimental examination of solute transport by surface runoff from low-angle slopes. **Journal of Hydrology, Amsterdam**, v.233, p.19-36, 2000.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York : Academic, 1980.

WOOD, J. **The geomorphological characterization of digital elevation models**. PhD Tesis. City University. London. Disponível em: <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd>. 185p. 2000. Acesso em 26 jun. 2009