

# VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM TERRA PRETA DE ÍNDIO SOB CULTIVO DE CAFÉ CONILON

Pedro Cardoso Mota Júnior<sup>1</sup>, Milton César Costa Campos<sup>2</sup>, Bruno Campos Mantovanelli<sup>3</sup>,  
Uilson Franciscon<sup>4</sup>, José Mauricio da Cunha<sup>5</sup>

(Recebido: 18 de julho de 2016; aceito: 06 de outubro de 2016)

**RESUMO:** A conversão de ecossistemas naturais em sistemas agrícolas provoca alterações significativas nos atributos do solo, associado ao crescente desmatamento na região amazônica influenciando a desestabilização do ecossistema. Dessa forma, objetivou-se com este estudo avaliar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de terra preta de índio (TPI) sob cultivo de café Conilon. Foi demarcado um grid amostral com dimensões de 88 × 64 m, com espaçamento regular de 8 m, perfazendo um total de 88 pontos amostrais. Foram coletadas amostras estruturadas e indeformadas nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Realizaram-se as seguintes análises físicas: granulometria, estabilidade de agregados, carbono orgânico total (COT), estoque de carbono (EstC), macroporosidade (MaP), microporosidade (MiP), densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), resistência do solo à penetração (RP) e umidade volumétrica ( $\theta$ ). Os resultados foram submetidos à análise estatística descritiva e geoestatística. As TPI's apresentam grande potencial que podem subsidiar o aumento na produção, visto que estes solos apresentam excelente condição que se refere aos atributos físicos, sendo que nas camadas avaliadas estes não apresentaram nenhuma restrição e impedimento ao sistema radicular da cultura.

**Termos para indexação:** Geoestatística, atributos do solo, manejo, semivariogramas escalonados; TPI.

## SPATIAL VARIABILITY OF PHYSICAL ATTRIBUTES OF THE SOIL IN AMAZONIAN BLACK SOIL UNDER COFFEE CULTIVATION

**ABSTRACT:** *The conversion of natural ecosystems into agricultural systems causes significant changes in soil properties associated with the growing deforestation in the Amazon region influencing the destabilization of the ecosystem. Thus, it is aimed with this study was to evaluate the spatial variability of physical attributes of the soil in black Indian land area (ICC) under Conilon coffee cultivation. It was marked a sampling grid with dimensions of 88 × 64 m, with regular spacing of 8 m, for a total of 88 sampling points, structured and undisturbed soil samples were collected in layers of 0.00 to 0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m. We conducted the following physical analysis: particle size, aggregate stability, total organic carbon (TOC), carbon stock (EstC), macroporosity (MAP), microporosity (MiP), bulk density (Ds), total porosity (PT), soil penetration resistance (RP) and volumetric water content ( $\theta$ ). The results were submitted to descriptive statistical and geostatistical analysis. The ICC's exhibit great potential that can support the increase in production, since they have excellent soil condition that refers to physical attributes, and evaluated in these layers exhibited no constraint and hindrance to the root culture.*

**Index terms:** *Geostatistics; soil properties; management; semivariogram staggered; TPI.*

## 1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura, atualmente, ocupa uma área de 2,2 milhões de hectares plantados no Brasil, segundo os dados da Companhia Nacional do Abastecimento (CONAB, 2016), sendo que o Brasil é maior produtor e o maior exportador mundial de café, com mais de 40,3 milhões de sacas beneficiadas na safra 2015/16. Desse total, cerca de 81,1% é de café Arábica e o restante de café Conilon. Em relação à produtividade, no Amazonas, esta não ultrapassa 9 sacas ha<sup>-1</sup>, e conforme as estimativas recentes da produção, o

estado aparece com uma produção muito baixa, muito em função das condições de solos, os quais praticamente não são manejados no que se refere a adubação e correção por práticas de calagem (GONÇALVES et al., 2015).

Em meio à vasta região Amazônica ocorrem áreas em que a característica original do solo foi modificada por processos antrópicos, tais solos são conhecidos como Terras Pretas de Índio (TPI) ou Terra Preta Arqueológica (TPA), podendo ser comumente encontrados na paisagem Amazônica (CAMPOS et al., 2011).

<sup>1,4</sup>Universidade Federal do Amazonas/UFAM - Instituto de Educação Agricultura e Ambiente - Campus de Humaitá - Departamento de Engenharia Ambiental - Cx.P. 2314 - 69.800-000 - Humaitá - AM - pedrocardoso115@gmail.com, uilsonfranciscon@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal do Amazonas/UFAM - Instituto de Educação Agricultura e Ambiente - Campus de Humaitá - Departamento de Agronomia/DEPA - Cx. P. 2314 - 69.800-000 - Humaitá - AM - mcesarsolos@gmail.com

<sup>3</sup>Universidade Federal de Santa Maria/UFSM - Departamento de Ciências Rurais/CCE - Cx. P. 3994 - 97105-090 - Santa Maria - RS - brunomantovanelli21@gmail.com

<sup>5</sup>Universidade Federal do Amazonas/UFAM - Instituto de Educação Agricultura e Ambiente - Campus de Humaitá - Departamento de Matemática e Física - Cx. P. 2314 - 69.800-000 - Humaitá-AM - maujmc@gmail.com

Nos últimos anos, as áreas de TPI vêm sendo constantemente exploradas de forma rudimentar, principalmente para atividades agrícolas, aos quais os processos de uso e manejo provocam alterações significativas em ambientes nativos, degradando o solo (CAMPOS et al., 2012b). A retirada da cobertura vegetal original, para implantação de culturas e práticas de manejo inadequadas, promove modificações nos atributos do solo, limitando sua utilização agrícola e tornando-o mais suscetível à erosão hídrica (CARVALHO FILHO et al., 2009). Estudos sobre uso e manejo dos solos são de fundamental importância para adoção de sistemas produtivos mais compatíveis com a característica do ambiente avaliado (ROZANE et al., 2010).

O conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo, em áreas naturais e antropizadas, é de extrema importância, pois os processos de formação que imprimiram ao longo do tempo, somados ao manejo realizado pelo homem, acentuam a variação dos atributos do solo e seu entendimento é fundamental para o refinamento das práticas de manejo e avaliação dos efeitos sobre o ambiente (CAMBARDELLA et al., 1994; CAVALCANTE et al., 2007). De acordo com Oliveira et al. (2015), as dificuldades encontradas em estudos de variabilidade dos atributos do solo se devem à grande extensão territorial da região amazônica e poucos pesquisadores; assim, a quantidade de amostras torna a prática onerosa, além da falta de conhecimento e a escolha de um padrão do espaçamento amostral.

Dessa forma, objetivou-se, com este estudo avaliar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de terra preta de índio (TPI) sob cultivo de café Conilon.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está situada no município de Apuí, sul do estado do Amazonas, às margens da BR 230, sob as coordenadas geográficas de 07° 59' 77 S e 61° 39' 51 W e altitude média de 180 m (Figura 1). A zona climática da região, segundo a classificação de Köppen, pertence ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) e tipo climático Am (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração, com precipitação média anual variando entre 2.250 e 2.750 mm, e com período chuvoso iniciando em outubro e prolongando-se até junho. As médias anuais de temperatura variam em torno de 25° C e 27° C. A umidade relativa do ar varia entre 85 e 90% (SDS, 2004).

A geologia da região de Apuí envolve o domínio geológico formado por rochas mais antigas (Proterozóicas e Paleozóicas). A vegetação característica dessa região é a Floresta Tropical Densa, constituída por árvores adensadas e multiestratificadas de 20 a 50 m de altura, com clima úmido, elevadas temperaturas e alta precipitação (AMAZONAS, 2004).

A pesquisa foi realizada entre agosto e dezembro de 2014, sendo delimitado um grid amostral com as dimensões 88 x 64 m, com espaçamento regular de 8 m entre os pontos, perfazendo um total de 88 pontos amostrais em uma área cultivada com café Conilon. Foram coletadas amostras em estrutura preservada na forma de agregados e em anéis volumétricos nas profundidades: 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, perfazendo um total de 352 amostras.

Para determinação da estabilidade de agregados, utilizou-se das amostras em estrutura preservada. A separação e a estabilidade dos agregados foram determinadas segundo Kemper e Chepil (1965). Os resultados foram expressos em diâmetro médio geométrico (DMG). A análise granulométrica foi determinada pelo método da pipeta, após dispersão da amostra com NaOH 1,0 mol L<sup>-1</sup> e agitação rápida (6.000 rpm), por 15 min (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2011).

A porosidade total foi determinada pelo método da saturação, que consiste na saturação das amostras antes serem levadas para a mesa de tensão. Para a quantificação da macroporosidade (MaP), está foi obtida a partir do equilíbrio do conjunto (anel-solo), após aplicada a tensão de 6 kPa em mesa de tensão. A microporosidade (MiP) foi obtida após subtração do peso do conjunto anel-solo equilibrados à 60 kPa e o seu respectivo peso seco em estufa a 105 °C. A umidade volumétrica ( $\theta$ ) foi obtida pela diferença entre a massa do solo úmido e a massa do solo seco em estufa a 105 °C durante 24 h (EMBRAPA, 2011). A determinação da densidade do solo (Ds) foi realizada pelo método do anel volumétrico, com coleta de amostras em estrutura preservada, em cilindros com volume médio de 98,33 cm<sup>3</sup>.

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada a partir das mesmas amostras coletadas para avaliação de Ds e porosidade total (PT) do solo, as quais foram determinadas em laboratório utilizando um penetrômetro eletrônico com velocidade constante de 0,1667 mm s<sup>-1</sup>, equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semiângulo de 30°, receptor e interface acoplado a um microcomputador para registro das leituras por meio de um software próprio do equipamento (DALCHIAVON et al., 2011).

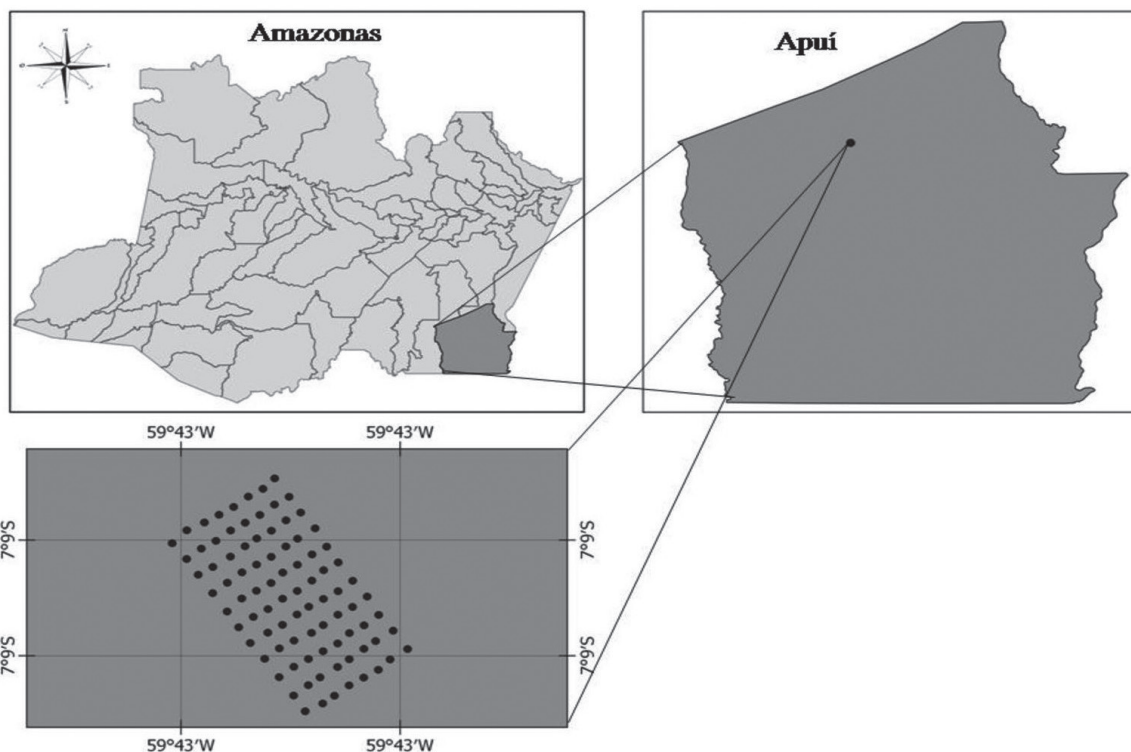


FIGURA 1 - Mapa de localização do município de Apuí, AM e grid amostral da área de estudo.

O carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yeomans e Bremner (1988), o estoque de carbono (EstC) foi determinado em todas as profundidades de coleta e foi calculado pela expressão (WELDKAMP, 1994), conforme equação (1).

$$\text{EstC} = \text{COT} \times \text{Ds} \times e$$

Em que: COT: Carbono orgânico total; Ds: Densidade do solo; e: espessura da camada avaliada.

Após obtenção dos dados, foram realizadas as análises exploratórias, calculando-se a média, a mediana, o desvio padrão, o coeficiente de variação (CV), de assimetria e de curtose, a partir do software estatístico Minitab 14.0 (MINITAB, 2000). O CV foi calculado com base no critério de Warrick e Nielsen (1980), que classifica o CV como baixo <12%, médio de 12% a 24% e alto >24%. Para a hipótese de normalidade, foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov. Para a caracterização da variabilidade espacial, utilizou-se a análise geoestatística. Sob a teoria da hipótese

intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela equação (2):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Em que: (h) é o valor da semivariância para uma distância h; N(h), o número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; Z(xi), o valor do atributo Z na posição xi; Z(xi+h), o valor do atributo Z separado por uma distância h da posição xi.

Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de  $\hat{\gamma}(h)$  são definidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (efeito pepita,  $C_0$ ; variância estrutural,  $C_1$ ; patamar,  $C_0 + C_1$ ; e alcance, a) (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). Na determinação da existência ou não da dependência espacial (DE), utilizou-se o exame de semivariogramas, por meio do programa GS<sup>+</sup> (ROBERTSON, 1998). Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, considerou-se o melhor coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Para analisar o grau da dependência espacial

(GDE) dos atributos em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que são considerados dependência espacial forte os semivariogramas que têm efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar, moderada quando está entre 25% e 75% e fraca quando for maior que 75%.

Para a modelagem dos semivariograma escalonado, primeiramente foram modelados os atributos do solo no software Gs+. Para a escolha do melhor modelo e obtenção da distância média e semivariância média de cada atributo, estes valores foram colocados em planilha Excel, para a modelagem do semivariograma escalonado pela equação (3).

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right], h \geq 0$$

Em que:  $C_0 + C_1$  = patamar;  $a$  = alcance do semivariograma; Exp = modelo do escolhido para modelagem dos semivariogramas escalonados;  $h$  = distância de separação entre duas observações.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos valores médios obtidos para os atributos físicos (Tabela 1), é notória a tendência de qualidade estrutural física destes solos de TPI, muito em função de sua origem antropogênica, pois todos os parâmetros físicos avaliados estão dentro dos limites adequados para que ocorra o pleno desenvolvimento das culturas, principalmente para a cultura em questão a qual está implantada na área de estudo. Os valores médios referentes a RP indicaram aumento conforme as variações na profundidade, corroborando Soares et al. (2015) no qual estudaram os atributos físicos em solos de TPI sob pastagem. Mesmo com este crescente aumento os valores encontrados estão bem abaixo do limite de 2,0 Mpa estabelecido por Araújo, Tormena e Silva (2004), no qual é caracterizado como prejudicial para que ocorra o crescimento e desenvolvimento radicular.

Os resultados obtidos para as variáveis de MaP, MiP, PT e umidade volumétrica, estão adequadas às condições estabelecidas por Araújo, Tormena e Silva (2004) que afirmam que os limites considerados ideais para o pleno desenvolvimento de plantas é de no mínimo 10% para a MaP e umidade do solo de 20 %, pois, é necessário manter o solo acima ou abaixo desses limites para garantir condições adequadas para as plantas, pois

MaP inferior a 10% imprime inadequada difusão de oxigênio para atender à demanda respiratória das raízes e o adequado crescimento e atividade de micro-organismos. Outro fator que explica a natureza destas variáveis é o material orgânico presente nestes solos, o que favorece diretamente a aeração, possibilitando assim que ocorra o equilíbrio de macroporos facilitando a distribuição de oxigênio e o equilíbrio de microporos (em seu limite superior de 50  $\mu$ m) em condições suficientes para que ocorra o armazenamento de água e redistribuição à matriz do solo, tornando está água altamente retida a altas tensões disponível para o sistema radicular.

A estabilidade de agregados apresentada a partir do DMG mostra variação conforme as camadas avaliadas. Para a área de estudo, os valores de DMG obtidos estão relacionados aos baixos valores de Ds nos horizontes antrópicos, corroborando os resultados encontrados por Campos et al. (2011) e Oliveira et al. (2015), os quais estudando TPAs na região Sul do Amazonas encontraram resultados expressivos de DMG associados a baixa Ds. Estudando solos antropogênicos Campos et al. (2012a) encontraram resultados semelhantes ao deste estudo para estas variáveis descritas anteriormente, afirmando também que estes resultados estão relacionados à formação dos solos de TPI's que concentram grandes quantidades de matéria orgânica derivada da queima parcial do carvão vegetal, e conhecendo que as TPI's são formadas por um grande depósito estável de matéria orgânica, contendo aproximadamente 30% de carbono preto, originado da queima incompleta da biomassa, sendo este, um dos possíveis agentes responsáveis pela alta capacidade de estoque de nutrientes no solo, possibilitando a maior aeração e como consequência, a predominância em formações de microagregados (GLASER et al., 2000).

Os baixos valores de Ds encontrados (Tabela 2) são resultantes dos elevados teores de carbono orgânico e de intensa atividade biológica (fauna e raízes), que constroem canais, cavidades e galerias (STEINBEISS; GLEIXNER; ANTONIETTI, 2009). Estudando Ds em solos antrópicos Campos et al. (2012a) e Rodrigues et al. (2015), também encontraram baixos índices para esta variável física, e atribuíram tais valores aos elevados teores de matéria orgânica desses solos, que contribuem diretamente como fator que possibilita a maior aeração do solo, ocasionando assim baixos índices para a Ds.

**TABELA 1** - Estatística descritiva dos atributos físico-hídricos em área de Terra Preta de Índio sob cultivo de café em Apuí, AM.

Estatística Descritiva	MaP	MiP	PT	RP	$\theta$	DMG
	----- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----			MPa	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	mm
0,00 - 0,05 m						
Média	0,23	0,37	0,60	1,04	0,45	2,79
Mediana	0,24	0,36	0,61	1,04	0,46	2,77
Máximo	0,29	0,41	0,66	1,84	0,62	3,33
Mínimo	0,17	0,33	0,54	0,49	0,30	2,47
<sup>1</sup> CV (%)	13,85	5,33	4,96	29,07	18,97	7,83
Assimetria	-0,28	-0,05	-0,36	0,39	0,14	0,14
Curtose	-0,59	-0,55	-0,18	-0,01	-0,75	-0,75
<sup>2</sup> d	*	*	*	*	*	*
0,05 - 0,10 m						
Média	0,19	0,37	0,56	1,13	0,41	2,72
Mediana	0,19	0,37	0,56	1,14	0,40	2,71
Máximo	0,28	0,42	0,65	1,67	7,46	3,25
Mínimo	0,11	0,33	0,48	0,59	2,15	2,15
<sup>1</sup> CV (%)	22,10	6,18	7,64	21,37	28,31	9,08
Assimetria	0,09	0,38	0,01	-0,14	0,56	0,56
Curtose	-0,88	-0,35	-0,80	-0,36	0,27	0,27
<sup>2</sup> d	0,18	*	*	*	*	*
0,10 - 0,20 m						
Média	0,16	0,37	0,54	1,28	0,38	2,22
Mediana	0,17	0,37	0,54	1,25	0,37	2,21
Máximo	0,26	0,42	0,64	2,16	0,62	2,75
Mínimo	0,06	0,33	0,47	0,55	0,02	1,70
<sup>1</sup> CV (%)	31,67	5,38	7,87	32,45	25,54	11,88
Assimetria	-0,04	0,24	0,12	0,28	0,59	0,08
Curtose	-0,99	-0,41	-0,63	-0,63	0,20	-0,45
<sup>2</sup> d	0,19	*	*	*	*	*
0,20 - 0,30 m						
Média	0,11	0,39	0,51	1,71	0,33	2,50
Mediana	0,10	0,40	0,51	1,65	0,29	2,53
Máximo	0,17	0,43	0,54	2,56	0,53	2,83
Mínimo	0,07	0,35	0,47	1,11	0,10	1,90
<sup>1</sup> CV (%)	20,38	6,12	3,85	23,52	31,22	9,43
Assimetria	0,47	-0,27	-0,34	0,75	-0,08	-0,71
Curtose	-0,23	-0,71	-0,55	-0,23	0,17	0,20
<sup>2</sup> d	*	*	*	*	0,02	*

<sup>1</sup>CV: coeficiente de variação; <sup>2</sup>d: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov; \*significativo a 5 % de probabilidade; MaP: Macroporosidade; MiP: Microporosidade; PT: Porosidade Total; RP: Resistência do Solo a Penetração;  $\theta$ : Umidade Volumétrica; DMG: Diâmetro Médio Geométrico.

**TABELA 2** - Estatística descritiva de atributos físicos em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de café em Apuí, AM.

Estadística Descritiva	Areia	Silte g kg <sup>-1</sup>	Argila	Ds g cm <sup>-3</sup>	COT g kg <sup>-1</sup>	EstC g kg <sup>-1</sup>
0,00 - 0,05 m						
Média	371,95	611,30	16,74	1,07	39,03	20,75
Mediana	370,50	612,44	16,90	1,08	36,60	19,21
Máximo	426,66	666,38	18,98	1,19	62,06	32,89
Mínimo	315,91	558,83	14,50	0,96	22,89	13,05
<sup>1</sup> CV (%)	6,55	3,95	6,34	5,44	29,43	27,63
Assimetria	-0,09	0,07	0,07	-0,11	0,40	0,50
Curtose	0,11	-0,01	-0,01	0,05	-1,06	-0,93
<sup>2</sup> d	*	*	*	0,14	*	0,18
0,05 - 0,10 m						
Média	417,96	568,26	13,76	1,17	35,95	20,99
Mediana	421,96	568,65	14,14	1,18	38,31	21,02
Máximo	475,98	626,65	17,16	1,39	58,65	34,61
Mínimo	358,28	508,39	9,83	0,97	12,84	6,87
<sup>1</sup> CV (%)	7,06	5,13	12,14	8,78	31,72	32,81
Assimetria	0,07	-0,06	-0,60	0,02	-0,41	-0,26
Curtose	-0,70	-0,69	0,06	-0,66	-0,32	-0,60
<sup>2</sup> d	*	*	0,05	*	0,00	0,00
0,10 - 0,20 m						
Média	349,49	631,15	19,34	1,23	35,24	43,40
Mediana	349,01	631,35	19,27	1,23	35,52	43,23
Máximo	414,50	680,53	24,81	1,45	47,31	62,96
Mínimo	294,74	570,45	15,05	0,93	24,24	25,71
<sup>1</sup> CV (%)	7,48	3,97	10,70	10,81	14,86	18,82
Assimetria	0,02	-0,01	0,40	-0,17	-0,27	-0,14
Curtose	-0,19	-0,30	0,34	-0,79	-0,18	-0,35
<sup>2</sup> d	*	*	*	*	*	*
0,20 - 0,30 m						
Média	310,96	667,12	21,90	1,34	11,67	15,73
Mediana	318,72	659,57	21,82	1,35	12,00	16,44
Máximo	422,87	758,19	28,89	1,43	18,38	24,27
Mínimo	212,92	563,99	13,14	1,25	8,51	8,51
<sup>1</sup> CV (%)	16,33	7,02	19,22	3,33	25,74	25,75
Assimetria	0,00	0,02	-0,17	-0,11	0,23	0,11
Curtose	-0,41	-0,39	-0,84	-0,21	-0,38	-0,60
<sup>2</sup> d	*	*	*	*	*	*

<sup>1</sup>CV: coeficiente de variação; <sup>2</sup>d: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov; \*significativo a 5 % de probabilidade; Ds: Densidade do Solo; COT: Carbono Orgânico Total; EstC: Estoque de Carbono.

Os atributos granulométricos apresentados na Tabela 2 indicam a maior predominância das frações de silte e areia respectivamente, nas camadas avaliadas. A dominância da fração de areia e silte também foi encontrada por Campos et al. (2012a), estudando a caracterização de horizontes antrópicos na região de Apuí - AM, associando esta característica granulométrica à formação destes solos e materiais constituintes.

Os teores de COT apresentaram grande variação na camada superficial (Tabela 2) corroborando os resultados obtidos por Campos et al. (2012a) e Cunha et al. (2007) que encontraram maiores teores de carbono nos horizontes A de solos antropogênicos na região Amazônica. Esses resultados podem ser atribuídos ao carbono pirogênico (carvão) proveniente das atividades dos povos indígenas pré-colombianos, conforme destaca Glaser et al. (2000), ou à dominância de estruturas aromáticas, com baixo grau de substituição de oxigênio (Cunha et al., 2007). O EstC apresentou um decréscimo a partir da camada de 0,2 – 0,3 m, sendo esta condição característica das TPI's, visto que em sua grande maioria o horizonte antrópico tem uma camada de aproximadamente 0,4 m, e a partir dessa redução no EstC, o fator de horizonte adjacente é uma condição que reduz estes valores, influenciado pela não ocorrência de resíduos orgânicos oriundos das ações de povos pré-colombianos, corroborando Campos et al. (2012a) estudando a caracterização de solos antrópicos.

Conforme os resultados referentes às análises de estatística descritiva apresentados nas Tabelas 1 e 2, os valores de média e mediana apresentam distanciamento para areia e COT na camada de 0,0-0,05 m e areia e silte na camada de 0,2-0,3 m. As demais variáveis apresentaram aproximação, indicando assim a distribuição simétrica destes parâmetros, o qual são confirmados pelos valores de assimetria e curtose próximos a zero. No entanto, segundo Guimarães et al. (2010), esta variação entre média e mediana não caracteriza afastamento expressivo da normalidade, apenas evidencia que, na natureza, não são encontradas distribuições que sejam absolutamente normais. A partir do critério de normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, as informações geradas pela análise exploratória permitem afirmar que as variáveis apresentam distribuição suficientemente simétrica para o emprego das análises geoestatísticas.

A partir do coeficiente de variação (CV), percebe-se que grande parte das variáveis estudadas apresentaram baixa variabilidade dos dados (Tabelas 1 e 2), à exceção de MaP, RP, umidade volumétrica, em todas as camadas avaliadas e argila nas profundidades de 0,05-0,10 m e 0,20-0,30 m, que apresentaram média variabilidade, enquanto que COT e EstC nas camadas de 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m apresentaram alto CV. Tais resultados obtidos estão em acordo com trabalhos desenvolvidos por Aquino et al. (2014), Campos et al. (2011a) e Cruz et al. (2010), os quais afirmam que a média e baixa variabilidade dos atributos físicos deve-se à similaridade dos processos de formação destes solos antropogênicos.

A partir das análises geoestatísticas identificou-se que as variáveis físicas apresentaram grau de dependência espacial (GDE) variando entre forte apenas para MaP e RP na camada de 0,1-0,2 m enquanto que as demais variáveis apresentaram GDE médio. O processo antrópico, ao qual estes solos foram submetidos ao longo dos anos, evidencia este comportamento, ainda mais associado ao processo de ocupação agrícola que ocasiona a modificação estrutural destes solos e com este fator, acarreta em uma maior variabilidade aos mesmos. Oliveira et al. (2015) e Rodrigues et al. (2015), encontraram forte e médio GDE para atributos físicos em áreas de TPI's na região Sul do Amazonas.

O ajuste dos semivariogramas pela análise geoestatística evidenciou que a área de estudo apresentou variabilidade no espaço dos atributos estudados (Tabelas 3 e 4). Os semivariogramas ajustaram-se preferencialmente aos modelos exponenciais, com valores de VC e R2 acima de 0,75. O COT referente à camada de 0,10 - 0,20 m e Argila, Ds e umidade volumétrica referentes a camada de 0,20 - 0,30 m, apresentaram efeito pepita puro (EPP), ou seja, variação espacial aleatória. A predominância do modelo matemático esférico predomina para trabalhos em ciência do solo, por outro lado destacam que os modelos de ajuste do semivariograma para as propriedades do solo mais frequentemente encontrados são os modelos esférico e exponencial.

Avaliando o alcance dos semivariogramas individuais, é possível observar que os atributos apresentaram variabilidade espacial menor que o estabelecido na malha amostral (Tabelas 3 e 4). Esses valores de alcance fornecem informações a respeito da heterogeneidade da distribuição espacial em relação às propriedades estudadas no ambiente de estudo, corroborando Oliveira et al. (2015).

**TABELA 3** - Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas dos atributos físico-hídricos em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de café em Apuí, AM.

Parâmetros	Map	MiP	PT	RP	$\theta$	DMG
0,00-0,05 m						
Modelo	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.
Efeito Pepita	1,67	1,62	1,60	0,04	0,00	0,10
Patamar	20,57	9,55	17,64	0,22	1,62	0,11
Alcance (m)	34,50	46,30	22,80	56,10	26,10	16,20
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,95	0,96	0,92	0,92	0,89	0,82
<sup>2</sup> GDE (%)	8,11	16,96	9,07	21,25	0,05	9,43
<sup>3</sup> VC (%)	0,92	0,74	0,91	0,94	0,87	0,76
0,05-0,10 m						
Modelo	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.
Efeito Pepita	1,72	0,01	3,16	0,03	0,00	0,00
Patamar	25,33	11,53	17,80	0,24	1,22	0,13
Alcance (m)	29,70	22,20	20,70	43,50	27,00	21,30
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,99	0,87	0,84	0,90	0,90	0,84
<sup>2</sup> GDE (%)	6,79	0,08	17,75	15,67	0,08	0,07
<sup>3</sup> VC (%)	0,79	0,99	0,87	0,79	0,90	0,83
0,10-0,20 m						
Modelo	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.
Efeito Pepita	6,95	1,82	1,99	0,06	0,00	0,00
Patamar	24,80	7,44	16,84	0,17	1,66	0,09
Alcance (m)	21,90	47,70	23,10	40,50	25,20	18,00
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,95	0,94	0,93	0,88	0,87	0,81
<sup>2</sup> GDE (%)	28,02	24,46	11,81	36,36	0,05	9,04
<sup>3</sup> VC (%)	0,82	0,75	0,83	0,77	0,87	0,89
0,20-0,30 m						
Modelo	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.	Lin	Exp.
Efeito Pepita	0,01	0,40	0,01	0,02	-	0,02
Patamar	20,70	7,75	17,25	0,24	-	0,38
Alcance (m)	15,60	23,10	31,50	17,40	-	29,70
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,88	0,91	0,93	0,90	-	0,85
<sup>2</sup> GDE (%)	0,04	22,85	0,05	8,33	EPP	5,26
<sup>3</sup> VC (%)	0,91	0,76	0,86	0,81	-	0,76

MaP: macroporosidade; MiP: microporosidade; VTP: volume total de poros; RP: resistência do solo a penetração;  $\theta$ : umidade volumétrica; DMG: diâmetro médio geométrico; Esf.: Esférico; Exp.: Exponencial; Lin: Linear; <sup>1</sup>R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; <sup>2</sup>GDE%: grau de dependência espacial e; <sup>3</sup>VC: validação cruzada.



**TABELA 4** - Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas das frações areia, silte, argila, Ds, COT e EstC do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de café em Apuí, AM.

Parâmetros	Areia	Silte	Argila	Ds	COT	EstC
0,00-0,05 m						
Modelo	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.	Lin	Exp.
Efeito Pepita	1,00	1,00	0,60	0,04	-	3,90
Patamar	1045,00	1350,00	4,63	0,08	-	50,37
Alcance (m)	25,80	34,50	26,40	18,00	-	17,10
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,87	0,95	0,97	0,78	-	0,85
<sup>2</sup> GDE (%)	0,09	0,07	12,95	13,45	EPP	7,74
<sup>3</sup> VC (%)	0,97	0,99	0,75	0,80	-	0,75
0,05-0,10 m						
Modelo	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.
Efeito Pepita	196,00	191,00	0,01	0,03	0,10	0,10
Patamar	1246,00	1171,00	8,56	0,01	120,40	44,35
Alcance (m)	20,40	18,30	17,70	24,90	15,00	15,30
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,92	0,90	0,82	0,92	0,76	0,76
<sup>2</sup> GDE (%)	15,73	16,31	1,16	12,09	8,30	2,25
<sup>3</sup> VC (%)	0,85	0,83	0,79	0,94	0,86	0,75
0,10-0,20 m						
Modelo	Exp.	Exp.	Lin	Lin	Exp.	Exp.
Efeito Pepita	74,00	71,00	-	-	9,70	18,10
Patamar	714,90	579,80	-	-	54,27	119,40
Alcance (m)	17,40	22,50	-	-	27,00	26,10
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,87	0,81	-	-	0,76	0,84
<sup>2</sup> GDE (%)	10,35	12,24	EPP	EPP	0,17	0,15
<sup>3</sup> VC (%)	0,77	0,78	-	-	0,83	0,81
0,20-0,30 m						
Modelo	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.	Exp.
Efeito Pepita	454,00	10,00	0,01	0,01	8,10	35,90
Patamar	3546,00	3334,00	16,27	0,01	53,62	90,64
Alcance (m)	23,10	23,40	16,80	16,80	20,40	25,50
<sup>1</sup> R <sup>2</sup>	0,83	0,81	0,82	0,95	0,83	0,89
<sup>2</sup> GDE (%)	12,80	0,29	0,06	0,00	15,10	39,60
<sup>3</sup> VC (%)	0,84	0,75	0,85	0,72	0,84	0,78

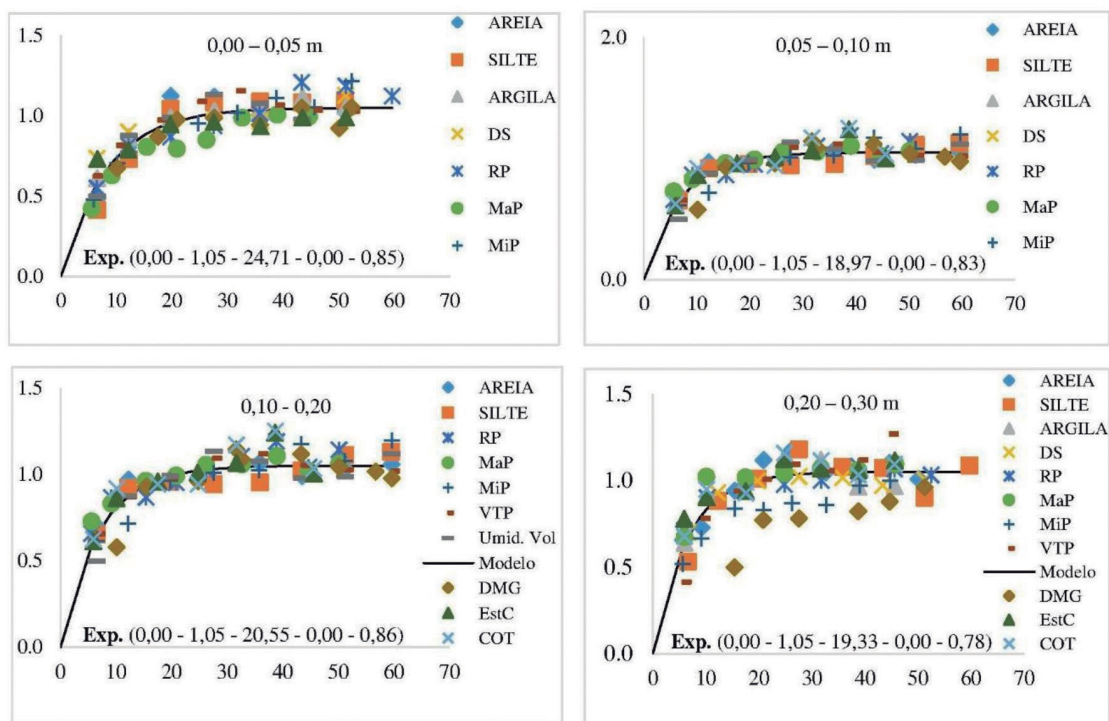
Ds: densidade do solo; COT: carbono orgânico total; EstC: estoque de carbono; Exp.: Exponencial; Lin: Linear; <sup>1</sup>R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; <sup>2</sup>GDE%: grau de dependência espacial e; <sup>3</sup>VC: validação cruzada.

A distância máxima na qual os atributos estão espacialmente correlacionados foi comparada para os diferentes atributos do solo na área estudada. A dimensão desse parâmetro indica um raio no qual os valores apresentados são correlacionados. Observou-se que os valores do alcance em sua maioria foram próximos, variando entre 15 e 56 m, o menor alcance foi encontrado para o COT, na profundidade de 0,05-0,10 m e o maior para a RP, na profundidade de 0,00-0,05m (Tabela 3 e 4). Os baixos valores de alcance obtidos estão relacionados com a baixa territorialidade das TPI's, sendo que estes solos apresentam uma pequena extensão, e desta forma a variabilidade do alcance também é caracterizada como baixa, não se alongando a solos adjacentes, corroborando Oliveira et al. (2015) e Rodrigues et al. (2015).

Os semivariogramas escalonados dos atributos físicos do solo são apresentados na Figura 2, onde para os atributos estudados o modelo que melhor se ajustou foi o modelo exponencial,

tendo o grau de dependência espacial (GDE) alto para areia, silte, argila, Ds, RP, MaP, MiP, PT,  $\theta$ , DMG e EstC, nas profundidades estudadas, demonstrando assim comportamento semelhante entre os atributos avaliados corroborando Oliveira et al. (2015) estudando atributos físicos de solos antrópicos na Amazônia Ocidental.

Avaliando os valores do alcance ajustados aos modelos dos semivariogramas escalonados, observou-se que o menor alcance de 18,97 m foi constatado na profundidade de 0,05-0,10m com e o maior alcance para profundidade 0,00-0,05m com 24,71m. Esses valores a partir dos semivariogramas escalonados evidenciaram que possivelmente existe maior heterogeneidade dos atributos na área de TPI, fato justificado em razão de esses solos serem formados por influência antrópica, o que ocasiona a maior variabilidade dos atributos estudados. Cabe salientar que a baixa variabilidade a partir do CV possibilita uma magnitude diferente dos dados, quando se compara com os semivariogramas escalonados.



**FIGURA 2** - Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonado ajustados aos atributos físicos do solo em área de Terra Preta de Índio sob o cultivo de café Conilon em Apuí, Amazonas. [Modelo (efeito pepita – patamar -alcance –GDE -  $R^2$ )]. GDE = grau de dependência espacial;  $R^2$  = Coeficiente de determinação; Ds: Densidade do Solo; COT: Carbono Orgânico Total; EstC: Estoque de Carbono; MaP: Macroporosidade; MiP: Microporosidade; PT: Porosidade Total; RP: Resistência do Solo a Penetração;  $\theta$ : Umidade Volumétrica; DMG: Diâmetro Médio Geométrico.

Estes, a partir da distribuição de frequência e posicionamento dos pontos na curva possibilitam evidenciar a possível heterogeneidade do ponto de vista espacial dos dados, em relação ao processo de formação, apesar de terem sofrido as mesmas influências, mas as alterações antrópicas ocasionam diferentes modificações nos atributos físicos do solo, e este fator ocasiona a heterogeneidade espacial destes solos.

#### 4 CONCLUSÕES

Os atributos físicos avaliados apresentaram estrutura de dependência espacial variando entre fraca a moderada, estando estes adequados ao modelo exponencial, caracterizados como o que melhor se adapta aos atributos físicos do solo e explicam a variabilidade espacial destas variáveis.

Os semivariogramas escalonados são valiosas ferramentas nos estudos geostatísticos, pois com base nos valores de alcance de dependência espacial pode-se inferir adequadamente sobre o maior ou menor grau de distribuição espacial dos atributos ao longo da área de estudo, além de possibilitar relacionar com a possível relação de distribuição espacial em uma determinada unidade de espaço.

A partir dos resultados médios obtidos percebe-se que as TPI's apresentam grande potencial do ponto de vista físico do solo para que ocorra desenvolvimento do cafeeiro em seus diferentes estágios de produção, contribuindo assim diretamente com a produção.

#### 5 REFERÊNCIAS

- AQUINO, R. E. et al. Geostatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 397-406, 2014.
- AMAZONAS. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Relatório técnico síntese dos diagnósticos: área estadual Sul de Apuí e Manicoré**. Manaus, 2004.
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 337-345, 2004.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, p. 1501-1508, 1994.
- CAMPOS, M. C. C. et al. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na região do médio rio Madeira. **Bragantia**, Campinas, v. 70, p. 18-27, 2011.
- \_\_\_\_\_. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de 314 solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **Agro@ambiente Online**, Boa Vista, v. 6, p. 102-109, 2012a.
- \_\_\_\_\_. Topossequência de solos na transição Campos Naturais-Floresta na região de Humaitá, Amazonas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 42, p. 387-398, 2012b.
- CARVALHO FILHO, A. et al. Qualidade física de um Latossolo vermelho fêrrico sob sistemas de uso e manejo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 25, p. 43-51, 2009.
- CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1329-39, 2007.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: café safra 2015/2016: segundo levantamento**, v. 2. Brasília, DF, 2016. 99 p.
- CRUZ, J. S. et al. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em Argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana de açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, p. 271-278, 2010.
- CUNHA, T. J. F. et al. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte A antrópico da Amazônia (Terra Preta). **Acta Amazônica**, Manaus, v. 37, p. 91-98, 2007.
- DALCHIAVON, F. C. et al. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, p. 8-19, 2011.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2011. 230 p.
- GLASER, B. et al. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. **Organic Geochemistry**, Bristol, v. 31, p. 669-678, 2000.
- GONÇALVES, E. T. et al. **Guia para produção de café sustentável na Amazônia: experiência de Apuí (AM)**. Piracicaba: Imaflora; Idesam, 2015. 33 p.

- GUIMARÃES, R. M. L. et al. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Nitossolo sob a cultura do feijoeiro irrigado. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, p. 657-669, 2010.
- KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Aggregate stability and size distribution. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: ASA, 1965. v. 1, p. 499-510.
- MINITAB. **MINITAB release 14.1**: statistical software. Montreal, 2000.
- OLIVEIRA, I. A. et al. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de argissolos da região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 668-681, 2015.
- ROBERTSON, G. P. **GS+**: geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152 p.
- ROZANE, D. E. et al. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um Latossolo vermelho distrófico, sob diferentes manejos. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, p. 24-32, 2010.
- SOARES, M. D. R. et al. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Belém, v. 58, p. 434-441, 2015.
- STEINBEISS, S.; GLEIXNER, G.; ANTONIETTI, M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. **Soil Biological Biochemical**, Madison, v. 41, p. 1301-1310, 2009.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, Madison, v. 38, p. 45-94, 1985.
- 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: Word Press, 1980. p. 319-344.
- WELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 175-180, 1994.