

ARTIGO ORIGINAL

Guilherme Adalberto Ferreira Castione¹
Zigomar Menezes Souza¹
Reginaldo Barboza da Silva²
Milton Cesar Costa Campos^{3*}

¹Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Faculdade de Engenharia Agrícola, Departamento de Água e Solo, Avenida Candido Rondon, 501, Barão Geraldo, Caixa Postal 6011, 13083-875, Campinas, SP, Brasil

²Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Campus de Registro, Rua Nelson Brihi Badur, 430, 11900-000 Registro, SP, Brasil

³Universidade Federal do Amazonas – UFAM, Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente, Rua 29 de Agosto, 786, Divino Pranto, 69800-000, Humaitá, AM, Brasil

Autor Correspondente:

*E-mail: mcesarsolos@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade física do solo
Balanço de carga
Paisagem

KEYWORDS

Soil physical quality
Charge balance
Landscape

Variabilidade de atributos físicos e crescimento de raízes do feijoeiro sob irrigação por pivô central

Spatial variability and physical attributes development of the roots of common beans under center pivot irrigation

RESUMO: Os atributos físicos do solo têm influência na melhoria das condições de crescimento do sistema radicular, colheita e manutenção da qualidade do solo. O pleno conhecimento da variabilidade destes atributos contribui para decisões estratégicas de manejo sustentável da exploração do solo. O objetivo foi estudar o efeito da irrigação no grau de dispersão em um Argissolo Vermelho-Amarelo sobre os atributos físicos e o crescimento de raízes do feijoeiro, ao longo de um declive. O experimento foi realizado na região de Cristalina-GO, em área irrigada sob pivô central. Foram coletadas amostras utilizadas nas seguintes determinações: densidade do solo; pH em água e KCl; argila dispersa em água; grau de dispersão do solo; grau de floculação; porosidade total; macroporosidade; microporosidade; e o balanço de cargas elétricas, por meio do delta pH. As amostras foram coletadas nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m e os atributos do solo, avaliados nos pontos de cruzamento de malha, com intervalos regulares de 10 m em três posições ao longo do declive de uma área de 1,8 ha, sob a irrigação de pivô central. As avaliações de raízes foram realizadas na entrelinha da cultura apenas para a camada de 0,00-0,20 m do solo. Os efeitos combinados da ação mecânica da água advinda do sistema de irrigação, da geoforma e do estado de carga elétrica do solo, predominantemente negativa, favoreceram o alto grau de dispersão da argila, implicando alterações de atributos dependentes da relação de massa e volume dos constituintes do solo estudado.

ABSTRACT: Soil physical attributes influence the improvement of root growth, harvesting, and maintenance of soil quality. A comprehensive knowledge of the variability of these attributes contributes to strategic decisions for the sustainable management of land use. Therefore, the objective of the present work was to study the effect of irrigation on the degree of dispersion of an Ultisol and its influence on soil physical attributes and beans root growth along the slope. The experiment was conducted in an area under center pivot irrigation in the municipality of Crystalline, Goiás state. Samples of disturbed and undisturbed soil were used in the following determinations: soil bulk density, pH in water and KCl, water dispersible clay, degree of dispersion, degree of flocculation, total porosity, macroporosity, microporosity, and soil electrical charge balance by delta pH. Samples were collected at the depths of 0.00-0.10 m, 0.10-0.20 m, and 0.20-0.30 m. Soil attributes were evaluated at the crossing points of a regular grid, with intervals of 10 m, in three positions along the slope of an area of 1.8 ha under the center pivot irrigation. Root evaluation was performed between rows only at the 0.00-0.20 m soil layer. The combined effects of the mechanical action of the water from the irrigation system, the geo-formation, and the soil electrical charge balance, which is predominantly negative, favored the high degree of clay dispersion, resulting in changes in attributes dependent on the mass and volume ratio of the constituents of the studied soil.

Recebido: 09 mar. 2014

Aceito: 14 nov. 2014

1 Introdução

No Estado de Goiás, segundo a Secretária de Estado e Gestão de Planejamento (SEGPLAN), o maior polo de irrigação está localizado no município de Cristalina, que se destaca como a maior região produtora de feijão do Estado. No ano de 2012, foram produzidas 94,2 mil toneladas de feijão, somando as três safras anuais, alcançando 27,7% da produção estadual (SEGPLAN, 2012). A irrigação por aspersão do tipo convencional, autopropelido e pivô central representam os métodos mais utilizados na cultura do feijoeiro na região de Cristalina-GO (Michelon et al., 2009).

Considerando os aspectos físico-químicos do solo, quando o pH em KCl é menor que o pH em água, o delta pH é negativo e, portanto, há carga negativa líquida, conferindo a este solo uma maior capacidade de troca catiônica (CTC). Por outro lado, se houver uma carga líquida positiva, haverá maior capacidade de troca aniônica (Sánchez, 1976). A magnitude da carga afeta o pH do solo no ponto isoelétrico, ou seja, no “ponto zero de carga” (PCZ). No PCZ, a argila flocula-se ao máximo. Segundo Sánchez (1976), o conteúdo de matéria orgânica do solo também influencia fortemente estas relações.

O grau de floculação e dispersão afetado pelo estado de carga elétrica do solo promove modificações da estrutura do solo, como observado por Biolders e Grymonprez (2010) e Dantas et al. (2012). Estudos de Helalia et al. (1998) e Apolino et al. (2006) revelam que o elevado grau de dispersão acarreta o transporte da fração argila para regiões de menores cotas e para horizontes subsuperficiais do solo, por força da chuva ou irrigação.

Os atributos do solo, portanto, estão sujeitos a modificações provocadas pelas ações do manejo e, também, pela posição na

paisagem, sendo que esta última controla o movimento de água (divergência e convergência), influenciando e condicionando ambientes erosionais e depressionais (Brito et al., 2006). Portanto, estudos que buscam compreender não apenas a composição do solo, mas a influência da geofoma, podem melhor esclarecer as alterações advindas do manejo sobre a variabilidade espacial de atributos do solo.

Com a modificação dos atributos físicos do solo pela ação do manejo do solo e/ou irrigação, aspectos físico-químicos do solo e declividade do terreno, influencia no crescimento radicular e produtividade da cultura. O sistema radicular do feijoeiro, de forma geral, atua na camada de 0,00-0,20 m. Neykova et al. (2011) avaliaram a densidade de raízes em um sistema de manejo consorciado intercalando milho (*Zea mays*) e feijão comum (*Paseollus vulgaris*) e verificaram que 50% do volume de raízes concentraram-se na camada de 0,15-0,21 m do solo. Freddi et al. (2005) avaliaram os atributos do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado e encontraram um alcance de raízes na camada de 0,00-0,20 m, com 62%-87% nos primeiros 0,10 m.

O objetivo foi estudar o efeito da irrigação em um Argissolo Vermelho-Amarelo sobre os atributos físicos e o crescimento de raízes do feijoeiro, ao longo de um declive.

2 Material e Métodos

O experimento foi realizado na fazenda varjão no município de Cristalina-GO, em área irrigada sob pivô central, com coordenadas geográficas de 16° 53' 35,59" de latitude sul e 47° 32' 16,75" de longitude oeste a 1.021 m de altitude (Figura 1). O clima é o tropical com estação seca (Aw), pelo critério de classificação climática de Köppen, tendo verão suave e inverno

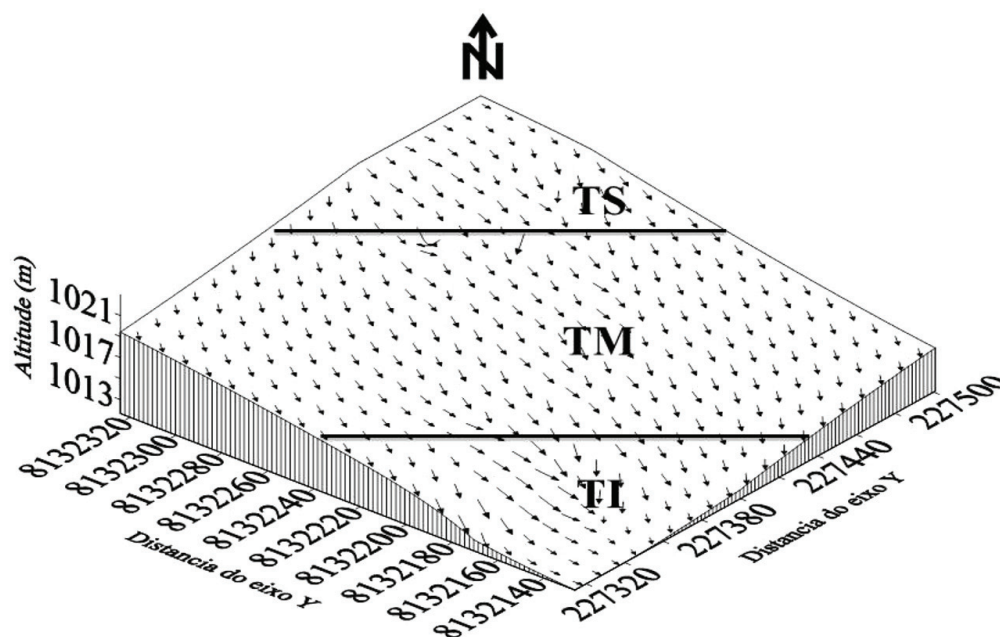


Figura 1. Mapa de estudo no município de Cristalina em área cultivada com feijão sob sistema plantio direto, com vetores indicando o caminhamento da água no terreno. TS - Terço Superior; TM - Terço Médio; TI - Terço Inferior.

Figure 1. Map of Cristalina-GO showing the plantation of beans grown in no-tillage system, with vectors indicating the area of ground water pathways. TS - Superior Rosary; TM - Third East; TI - Lower Third.

ameno, com diminuição de chuvas. O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 2013).

O solo foi cultivado com feijão cultivar carioca (*Phaseolus vulgaris* L.) em sucessão à cultura da soja (*Glycine max* L.), irrigada por pivô central, este atuando em uma área de 78 ha, correspondendo à área total de atuação do pivô, sob o sistema plantio direto. A densidade de plantio foi de 9,4 plantas por metro, semeadas com 0,45 m entrelinhas e 15 sementes por metro e realizadas duas operações de fertilização com formulação 10-30-10, totalizando 300 kg ha⁻¹ para o plantio e, 30-00-20, totalizando 190 kg ha⁻¹ em cobertura de acordo com análise química de solo.

A irrigação foi realizada por um sistema de pivô central, equipado com sprays providos de bocais do tipo giro fixo. O manejo de água baseou-se no monitoramento da tensão de água no solo com a reposição da lâmina correspondente a 50% da evapotranspiração da cultura (ETc), calculada com base na média do ano anterior. A ETc foi estimada a partir do valor da evapotranspiração de referência, determinada pelo método de Penman Monteith, multiplicada pelos valores correspondentes de Kc para cada estágio da cultura (Pereira et al., 2010). A tensão de água no solo foi monitorada por tensiômetros instalados nas profundidades de 0,15 e 0,30 m. Os valores de umidade do solo foram estimados pela curva de retenção de água do solo. No momento em que o solo atingia a tensão crítica de 35 kPa, a irrigação era iniciada, sendo que os valores médios de lâmina aplicados variaram de 8 a 10 mm a cada dois dias. Foi realizada a caracterização textural e química do solo em estudo (Tabela 1).

As coletas visando à caracterização da água foram realizadas no local de captação (córrego), antes da sucção da bomba d'água, de acordo com a norma NBR 9898 (ABNT, 1987), mergulhando-se o frasco de coleta com a boca voltada contra a corrente no líquido a ser amostrado; o frasco foi devidamente preso a um peso e arremessado a um ponto distante da margem, em cinco pontos da barragem de bombeamento para o pivô central. Posteriormente as amostras acondicionadas, foram enviadas ao laboratório (Tabela 2).

A partir do mapeamento semidetalhado da área de 78 ha, selecionou-se 1,8 ha para condução do experimento; utilizando-se de equipamento de sistema de posição global (DGPS), foi elaborado o mapa de elevação digital da área estudada (Figura 1). A amostragem, prospecção e avaliação dos atributos do solo consideram as seguintes posições do terreno: terço superior (TS - do ponto 0 a 60), médio (TM - do ponto 60 a 120); e inferior (TI - 120 a 180); sendo o superior com coordenada UTM de 227480 a 227440 m, o médio, de 227440 a 227360 m e o inferior da coordenada 227360 a 227320 m. Observa-se no mapa que há ocorrência de fluxo acumulado de água, indicado pelos vetores, com caminamento no mesmo sentido em toda a vertente.

As amostras com estrutura deformadas e indeformadas (coletadas com anéis volumétricos de 0,04 m de altura e 0,05 m de diâmetro) foram coletadas nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, nos pontos de cruzamento de malha, com intervalos regulares de 10 m em três posições ao longo do declive de uma área de 1,8 ha. Cada ponto da malha amostral foi georreferenciado, determinando a posição topográfica e a altitude, com o auxílio de uma estação total e DGPS.

A argila dispersa em água (ADA) e o grau de floculação (GF) foram determinados e estimados, respectivamente, de acordo com o método da (Embrapa, 2011). Foram determinados o pH em H₂O e em solução KCl 1 mol L⁻¹, utilizando a proporção 1:2,5 v/v de solo: extrator. A partir desses valores, foi estimado o delta pH (pH em H₂O – pH em KCl).

A densidade do solo foi calculada pela relação existente entre a massa do solo seco em estufa a 105 °C e o volume da amostra. A porosidade do solo foi obtida pelo método da mesa de tensão, aplicando-se uma coluna de 0,6 m nas amostras saturadas; após isso, as amostras foram levadas à estufa (105 °C). Os macroporos foram estimados como a diferença entre o conteúdo de água do solo saturado e o conteúdo de água após a aplicação da tensão definida. O volume de microporos foi estimado como sendo o conteúdo de água retido quando aplicada a tensão (Embrapa, 2011).

Tabela 1. Caracterização textural e química de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de feijão no sistema plantio direto em Cristalina-GO, na profundidade de 0,00-0,20 m.

Table 1. Particle texture and chemical characterization of a Ultisol bean cultivation in no tillage system at Cristalina-GO, at a depth of 0.00-0.20 m.

Análise Textural			pH		ΔpH	M.O.	Ca+Mg	Al	H+Al	S	CTC	V
areia	silte	argila	água	KCl								
-----g kg ⁻¹ -----						g kg ⁻¹	-----mmol _c dm ⁻³ -----				%	
514	45	441	5,17	4,48	-0,69	2,2	27,0	ALD	31,0	33,1	64,1	52

ALD = abaixo do limite de detecção (<0,005).

Tabela 2. Caracterização química e física da água de irrigação em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob cultivo de feijão no sistema plantio direto em Cristalina-GO.

Table 2. Chemistry and physics characterization of irrigation water in a Ultisol bean cultivation in no tillage system at Cristalina-GO.

Elementos	P	K	Ca	Mg	Na	Al	pH	C.E.
	-----ppm-----							μs/cm
	ALD	ALD	1,0	ALD	ALD	ALD	7,7	7,0

ALD = abaixo do limite de detecção (<0,005).

O sistema radicular foi avaliado quando a cultura se encontrava na fase de florescimento (38 DAE), retirando-se duas subamostras em cada ponto da malha amostral (180 pontos) na linha da cultura até 0,30 m de profundidade em intervalo de 0,10 m com trado de 0,71 m de diâmetro adaptado de Fujiwara et al. (1994). O volume de solo de cada camada avaliada foi lavado em peneiras de malha de 2,0 mm e as raízes foram secas em estufa a 65 °C até atingir massa constante. Em seguida, foram separadas as impurezas (solo e palha) presentes na amostra e, então, pesadas em balança semianalítica. Para obtenção dos dados de cada ponto, foi calculada a média das subamostras coletadas.

Os dados foram avaliados por meio de análise estatística descritiva, sendo calculados a média e o coeficiente de variação. Os valores médios dos atributos do solo foram comparados pelo teste t. A hipótese de normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, por meio do programa estatístico SAS Institute (Schlotzhaver & Littell, 1997). Os valores de cada atributo, maior do que a média mais quatro desvios padrões foram descartados, sendo o número de dados descartados inferior a 10% de cada conjunto de 180 dados.

A dependência espacial foi analisada por meio de ajustes de semivariogramas (Vieira, 2000), com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a qual é estimada pela Equação 1:

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

em que: $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ separados por uma distância h . O semivariograma é representado pelo gráfico $\hat{\gamma}(h)$ versus h .

Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\hat{\gamma}(h)$, são estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (o efeito pepita, C_0 ; patamar, $C_0 + C_1$; e o alcance, a).

Os modelos de semivariogramas considerados foram o esférico, o exponencial, o linear e o gaussiano, sendo ajustados por meio do programa GS+ (Robertson, 1998). Posteriormente, tais modelos foram usados no desenvolvimento de mapas de isolinhas (krigagem). Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, foi considerado o maior valor do coeficiente de correlação obtido pelo método de validação cruzada. Para elaboração dos mapas de distribuição espacial das variáveis, foi utilizado o programa Surfer (GOLDEN SOFTWARE, 1999).

3 Resultados e Discussão

Todas as variáveis em estudo apresentaram distribuição normal nas três profundidades estudadas, de acordo com o teste de Kolmogorov Smirnov (Tabela 3). Os valores de média e mediana das variáveis são próximos, indicando que os dados não possuem assimetria acentuada. Com base na classificação de Warrick & Nielsen (1980), apenas o atributo, massa de raízes, teve o coeficiente de variação (CV) alto, os demais atributos apresentaram CV médio. Silva et al. (2004), estudando o crescimento do sistema radicular de cultivares de feijão em reposta à calagem, observaram CV alto para

comprimento, superfície, volume e diâmetro de raiz no período de florescimento da cultura em um Latossolo Vermelho Distrófico na região de Botucatu.

Os valores médios do grau de floculação e dispersão de argila, de maneira geral, apresentaram comportamentos similares no solo estudado, independentemente do fator profundidade e posição na paisagem (Tabela 3). Os valores de delta pH (ΔpH) em profundidade, também, a exemplo do grau de floculação da argila (GFA) e grau de dispersão da argila (GDA), apresentaram o mesmo comportamento. Por outro lado, foram influenciados pela posição na paisagem, isto é, nota-se no terço médio diminuição deste atributo; também foi evidenciado um predomínio de carga líquida negativa em toda a área estudada. Estes resultados são corroborados com os encontrados por Campos et al. (2012), que também observaram predominância de carga líquida negativa no solo, trabalhando com Latossolo Amarelo e relacionando as superfícies geomórficas de uma topossequência na região de Humaitá (AM).

Os valores negativos são resultantes do maior valor de pH em água e, conseqüentemente, do delta pH do solo (Tabela 3). Para esta condição, espera-se o aumento da repulsão que favorece a dispersão de argila. Para Sánchez (1976), o delta pH para solos tropicais é comumente negativo, bem como as cargas presentes na superfície, e a predominância de carga negativa representa o domínio dos argilominerais silicatados.

O uso rotineiro do solo é uma atividade inevitável em áreas irrigadas, tal particularidade atribuiu alterações na porosidade do solo ao longo do seu perfil (Tabela 3). Os valores de macroporosidade e porosidade total na profundidade de 0,00-0,10 m mostram-se inferiores aos valores das profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Os dados estão de acordo com os de Michelon et al. (2009), que trabalharam com vários solos sob pivô central e observaram os menores valores de macroporosidade e porosidade total na profundidade 0,00-0,25 m. O sistema plantio direto, no qual a semeadura é realizada em solo coberto por palha e, portanto, com o mínimo de revolvimento da camada superficial do solo, tende a minimizar a formação de camadas compactadas no solo; apesar disso, a utilização continuada do plantio direto pode resultar em aumento da densidade do solo na camada de 0,00-0,10 m devido ao não revolvimento (Vieira & Klein, 2007).

Os valores de densidade do solo variaram entre 1,29 e 1,35 kg dm⁻³ nas diferentes profundidades estudadas (Tabela 3), assemelhando-se aos valores obtidos por Faraco et al. (2008) estudando a variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. A microporosidade obtida demonstra valores baixos, 0,27 a 0,29 m³ m⁻³, enquanto a macroporosidade, valores altos, 0,15 a 0,20 m³ m⁻³, segundo Michelon (2005), discordando dos resultados obtidos por Santos et al. (2012), que observaram valores altos de microporosidade (0,46 m³ m⁻³) e menores valores para macroporosidade (0,08 m³ m⁻³), avaliando a variabilidade espacial de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja.

A densidade do solo nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m dificultaram o crescimento do sistema radicular, visto que este se concentrou na camada de 0,00-0,20 m do solo (Tabela 1). Silva et al. (2004), trabalhando com sistema radicular de cultivares de feijão em Latossolo Vermelho

Tabela 3. Estatística descritiva dos atributos, Δ pH, grau de floculação da argila (GFA), grau de dispersão de argila (GDA), densidade do solo (DS), porosidade total (PT), macroporosidade e microporosidade nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m e volume de raízes na profundidade de 0,00-0,20 m, em um Argissolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de feijão no sistema plantio direto em Cristalina-GO em diferentes posições do terreno.

Table 3. Descriptive statistics of attributes, Δ pH, degree of clay flocculation (GFA), degree of clay dispersion (GDA), bulk density (DS), total porosity (TP), macroporosity and microporosity in the depths of 0.00 to 0, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 and root volume at a depth of 0.00-0.20 m, on a Ultisol bean cultivation in no tillage system in Cristalina- GO at different positions of the ground.

Variável	Prof. (m)	Posição do terreno (Terço)						PV ²
		Inferior		Médio		Superior		
		Média	CV ¹	Média	CV	Média	CV ¹	
Δ pH	0,0-0,1	[-0,71] a	[-0,71]	[-0,58] a	[-0,47]	[-0,69] a	[-0,64]	<0,0100
	0,1-0,2	[-0,72] a	[-0,75]	[-0,47] a	[-0,34]	[-0,69] a	[-0,67]	<0,0100
	0,2-0,3	[-0,75] a	[-0,77]	[-0,45] a	[-0,40]	[-0,76] a	[-0,70]	<0,0100
GFA (g kg ⁻¹)	0,0-0,1	56,48 a	10,85	56,21 a	12,04	54,20 a	17,40	<0,0100
	0,1-0,2	53,32 a	13,18	51,83 b	9,89	52,96 b	14,44	<0,0100
	0,2-0,3	52,24 b	14,17	52,24 b	14,17	49,20 b	16,22	<0,0100
GDA (g kg ⁻¹)	0,0-0,1	43,55 b	14,06	43,78 b	15,45	45,79 a	20,60	<0,0100
	0,1-0,2	46,67 a	15,06	47,99 a	10,61	47,03 a	16,26	<0,0100
	0,2-0,3	47,75 a	15,50	47,75 a	15,50	47,24 a	13,08	<0,0100
DS (kg dm ⁻³)	0,0-0,1	1,31 b	10,10	1,36 b	10,78	1,28 b	33,77	<0,0100
	0,1-0,2	1,35 a	11,26	1,39 a	8,16	1,32 a	8,60	<0,0100
	0,2-0,3	1,35 a	11,75	1,39 a	13,22	1,31 a	21,83	<0,0100
PT (m ³ m ⁻³)	0,0-0,1	0,44 b	16,73	0,43 b	8,22	0,44 b	33,46	<0,0100
	0,1-0,2	0,48 a	6,70	0,47 a	8,02	0,47 a	18,48	<0,0100
	0,2-0,3	0,47 a	10,12	0,48 a	20,68	0,48 a	21,18	<0,0100
Micro (m ³ m ⁻³)	0,0-0,1	0,29 a	17,86	0,27 a	14,42	0,29 a	10,30	<0,0100
	0,1-0,2	0,30 a	11,53	0,28 a	14,54	0,29 a	10,21	<0,0100
	0,2-0,3	0,30 a	10,13	0,30 a	10,24	0,29 a	21,05	<0,0100
Macro (m ³ m ⁻³)	0,0-0,1	0,15 b	10,12	0,18 a	10,20	0,15 b	28,50	<0,0100
	0,1-0,2	0,18 a	14,93	0,19 a	18,29	0,18 a	22,61	<0,0100
	0,2-0,3	0,17 a	15,34	0,18 a	26,30	0,19 a	21,60	<0,0100
Raízes (cm ³ /planta)	0,0-0,2	30,70	30,29	31,15	35,68	37,44	68,14	<0,0100

Médias seguidas das mesmas letras na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t; ¹CV - coeficiente de variação. ²PV - teste de Kolmogorov-Smirnov.

argiloso, observaram o dobro do volume de raízes de cultivar carioca em relação ao encontrado neste experimento.

Os valores de densidades do solo refletem principalmente a ação dos implementos agrícolas utilizados no plantio direto (mobilização geralmente até 0,15 m de profundidade e restrito à linha de plantio) (Tabela 3). De acordo com Helalia et al. (1998), a ocorrência de um alto valor de GDA no solo associado à movimentação do solo nas camadas superficiais contribui para o rearranjo de partículas do solo, promovendo a eluviação de argila para camadas subsuperficiais, bem como o adensando dessa faixa do solo.

Os resultados encontrados para o sistema radicular da cultura do feijão podem ser explicados, provavelmente, pela adaptabilidade às condições adversas, que esclarece muitas vezes o desenvolvimento de plantas em locais onde a condição física do solo é considerada limitante ou restritiva, pois a compactação do solo restringe o crescimento das raízes pela diminuição da macroporosidade e aumento da densidade do solo (Siqueira et al., 2009). Para Freddi et al. (2008), as raízes mudam a direção de crescimento e comumente concentram-se na faixa superficial do solo devido à compactação do

solo promovido pelo tráfego de máquinas. Com a redução de volume do solo, a movimentação de água na superfície e subsuperfície são afetadas, podendo influir no crescimento de raízes no solo (Souza et al., 2004).

A macroporosidade se manteve constante nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (Tabela 3), acordando com os resultados obtidos por Soracco et al. (2012), que estudaram a contribuição da macroporosidade para o fluxo total de água em diferentes tipos de solo e não encontraram diferença significativa para macroporos nas camadas 0,00-0,20 m do solo estudado.

Analisando as médias da microporosidade nas três faixas do terreno, observa-se que o volume deste atributo está abaixo do considerado ideal que é de 0,33 m³ m⁻³, que representa 1/3 do total de poros (Tabela 3). Segundo Vieira & Klein (2007), este valor atribui limitações ao pleno crescimento do sistema radicular, tendo em vista que ocorre a diminuição na taxa de difusão de gases pela dificuldade de infiltração da água no solo.

Observou-se o menor alcance para o atribuído GFA na profundidade de 0,0-0,10 m, indicando que a floculação de argila, além de ser maior na superfície, também apresenta

maior dependência espacial. Nessa condição, há a formação de microagregados que contribuem para maior absorção de água da chuva ou irrigação devido a maior atividade e superfície específica da argila (Tabela 4). O maior alcance foi atribuído à variável GDA na profundidade de 0,10-0,20 m, demonstrando que há maior dispersão de argila nesse solo na camada subsuperficial. Quanto aos modelos que obtiveram melhor ajuste, foram predominantemente exponencial e esférico, concordando com os resultados obtidos por Souza et al. (2004), que trabalharam em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar.

Picos dos teores de argila dispersa em água encontram-se distribuídos no terço médio e superior da encosta nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m (Figura 2). De acordo com Apolino et al. (2006), quando da ocorrência da variação de pH no solo, a concentração crítica da floculação de argila também é alterada, causando a dispersão da fração argila. Além disso, o emprego de irrigação por pivô central em área sem a presença de cobertura do solo beneficia o impacto de gotas d'água na superfície do solo, uma vez que a cultura anterior era soja e o volume de palha remanescente era baixo ou nulo na maior parte do terreno (Biielders & Grymonprez, 2010; Dantas et al., 2012).

Os maiores valores de GDA do solo foram observados no terço superior do terreno, evidenciando que, além da ação da energia cinética da água, provavelmente o efeito do balanço de carga líquida negativo dos colóides é mais expressiva na parte do terreno em que ocorre o fluxo acumulado de água, promovendo a migração de partículas do solo em profundidade e para as escalas do terreno de menor cota, aumentando inclusive o GFA (Cambreira-Martinez et al., 1989) (Figuras 2 e 3).

Provavelmente, ocorreu mudança nos tipos de íons do solo, uma vez que os elementos Ca^{+2} e Al^{+3} são cátions floculantes e o primeiro pode se manifestar no solo por conta de uma calagem superficial (Tabela 1), pois, como já sabido, a concentração de Ca^{+2} advinda da aplicação de calcário na superfície do solo pode afetar os atributos eletroquímicos e físicos do solo, designadamente no sistema de plantio direto, pois a aplicação superficial resulta na concentração de calcário na superfície do solo (Costa et al., 2004); porém Chaves et al. (1997) verificaram que a aplicação de carbonato de cálcio provoca um aumento no pH e diminui o teor de argila dispersa em água. Observe-se que a possibilidade de influência de íons advindos da água de irrigação é desprezível, uma vez que a presença

Tabela 4. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos, ΔpH , grau de floculação da argila (GFA), grau de dispersão da argila (GDA), densidade do solo (DS), porosidade do solo (PT), macroporosidade e microporosidade nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m e volume de raízes na profundidade de 0,00-0,20 m em um Argissolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de feijão no sistema plantio direto em Cristalina-GO.

Table 4. Semivariogram parameters adjusted for the attributes, ΔpH , degree of clay flocculation (GFA), degree of clay dispersion (GDA), bulk density (DS), soil porosity (TP), macroporosity and microporosity in the depths of 0, 00 to 0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 and root volume at a depth of 0.00-0.20 m at a Ultisol bean cultivation under no-tillage in Cristalina-GO.

Variável	Prof. (m)	Modelo ¹	² C ₀	Patamar	³ C ₀ /C ₀ +C ₁	⁴ R ²	Alcance
ΔpH	0,0-0,1	Exp	0,10	0,21	0,50	0,93	47,50
	0,1-0,2	Exp	0,12	0,25	0,50	0,93	43,80
	0,2-0,3	Exp	0,09	0,29	0,59	0,88	51,60
GFA (g kg ⁻¹)	0,0-0,1	Exp	7,20	47,46	0,848	0,92	10,21
	0,1-0,2	Exp	19,35	39,71	0,50	0,85	42,00
	0,2-0,3	Exp	6,70	54,58	0,87	0,84	14,70
GDA (g kg ⁻¹)	0,0-0,1	Esf	1,71	26,48	0,93	0,04	12,20
	0,1-0,2	Exp	19,74	39,49	0,50	0,90	41,40
	0,2-0,3	Exp	1,80	53,49	0,89	0,68	13,50
DS (kg dm ⁻³)	0,0-0,1	Esf	8,20	50,33	0,94	0,08	12,50
	0,1-0,2	Exp	7,35	43,62	0,85	0,39	22,20
	0,2-0,3	Exp	6,53	53,58	0,83	0,42	27,60
PT (m ³ m ⁻³)	0,0-0,1	Exp	5,47	47,30	0,84	0,57	25,20
	0,1-0,2	Exp	6,49	38,18	0,88	0,41	14,10
	0,2-0,3	Exp	7,13	37,61	0,93	0,07	10,50
Micro (m ³ m ⁻³)	0,0-0,1	Exp	8,23	58,23	0,85	0,54	13,16
	0,1-0,2	Exp	4,03	46,52	0,50	0,96	41,30
	0,2-0,3	Exp	5,35	45,51	0,50	0,86	37,80
Macro (m ³ m ⁻³)	0,0-0,1	Exp	4,25	40,26	0,82	0,29	27,00
	0,1-0,2	Exp	5,80	36,40	0,72	0,28	6,80
	0,2-0,3	Exp	6,33	37,66	0,87	0,30	20,10
Raízes (cm ³ /planta)	0,0-0,2	Exp	1,60	9640,0	0,89	0,53	28,80

¹EXP – exponencial e ESF – esférico; ²C₀ - Efeito Pepita; ³C₀/C₀+C₁ - Grau de dependência espacial; ⁴R² - Coeficiente de determinação.

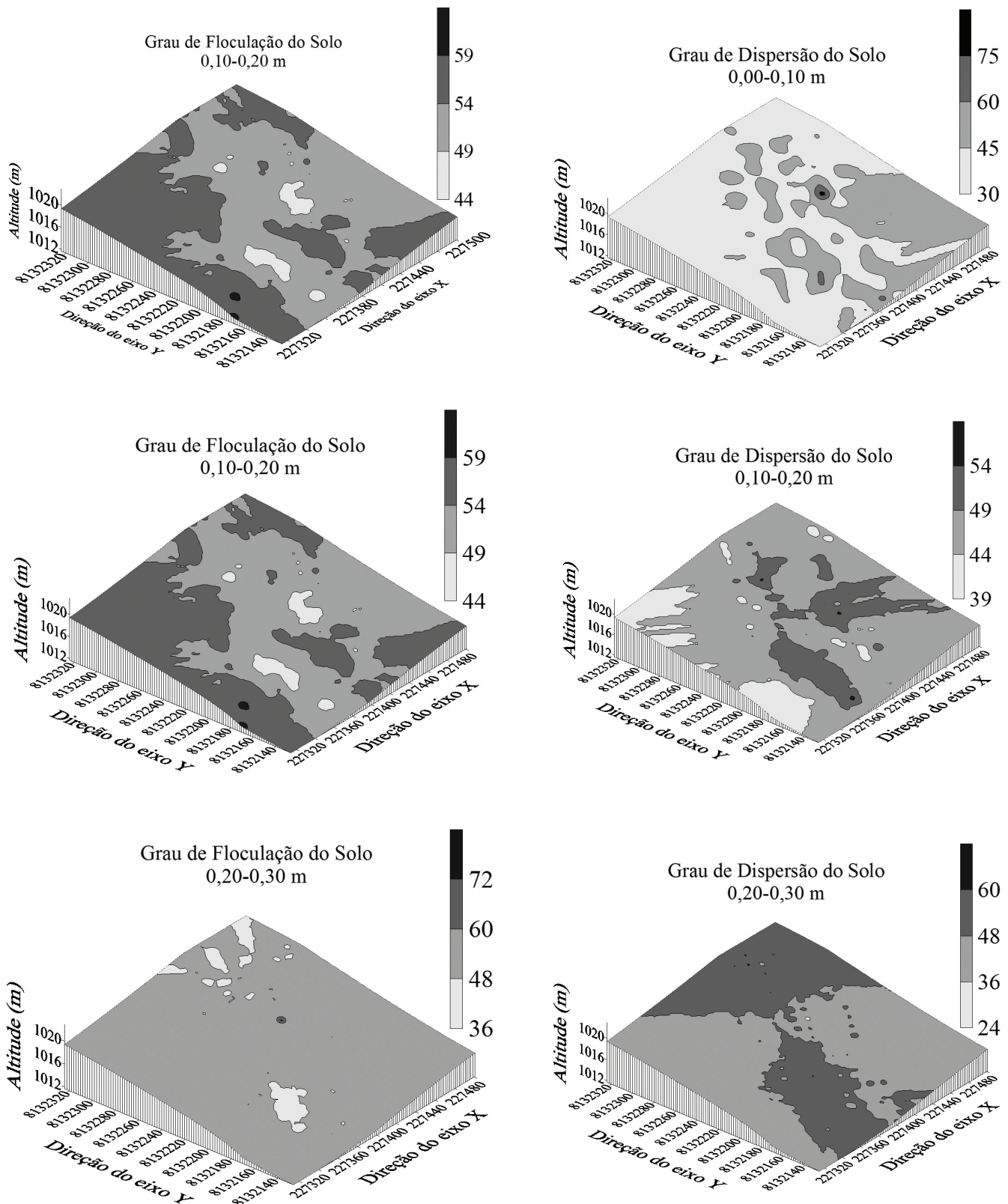


Figura 2. Variabilidade espacial do grau de floculação e dispersão da argila em um Argissolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de feijão no sistema plantio direto em Cristalina-GO, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Figure 2. Spatial variability of degree of flocculation and dispersion of clay into a Ultisol bean cultivation in no tillage system in Cristalina-GO at depths of 0.00-0.10, 0.10-0.20 and 0, 20 to 0.30 m.

desses elementos, com exceção do cálcio, esteve abaixo do limite de detecção (Tabela 2).

Analisando a dependência espacial dos valores de densidade do solo na profundidade de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m, é possível inferir que no terço superior ocorre a predominância

de valores na faixa de 1,05 a 1,20 kg dm^{-3} e 1,32 a 1,44 kg dm^{-3} , respectivamente (Figura 3), enquanto no terço médio, os valores predominantes variam entre 1,35 a 1,50 kg dm^{-3} e 1,44 a 1,56 kg dm^{-3} . Brito et al. (2006), estudando a otimização amostral de atributos de Latossolos sob cultivo de cana-de-

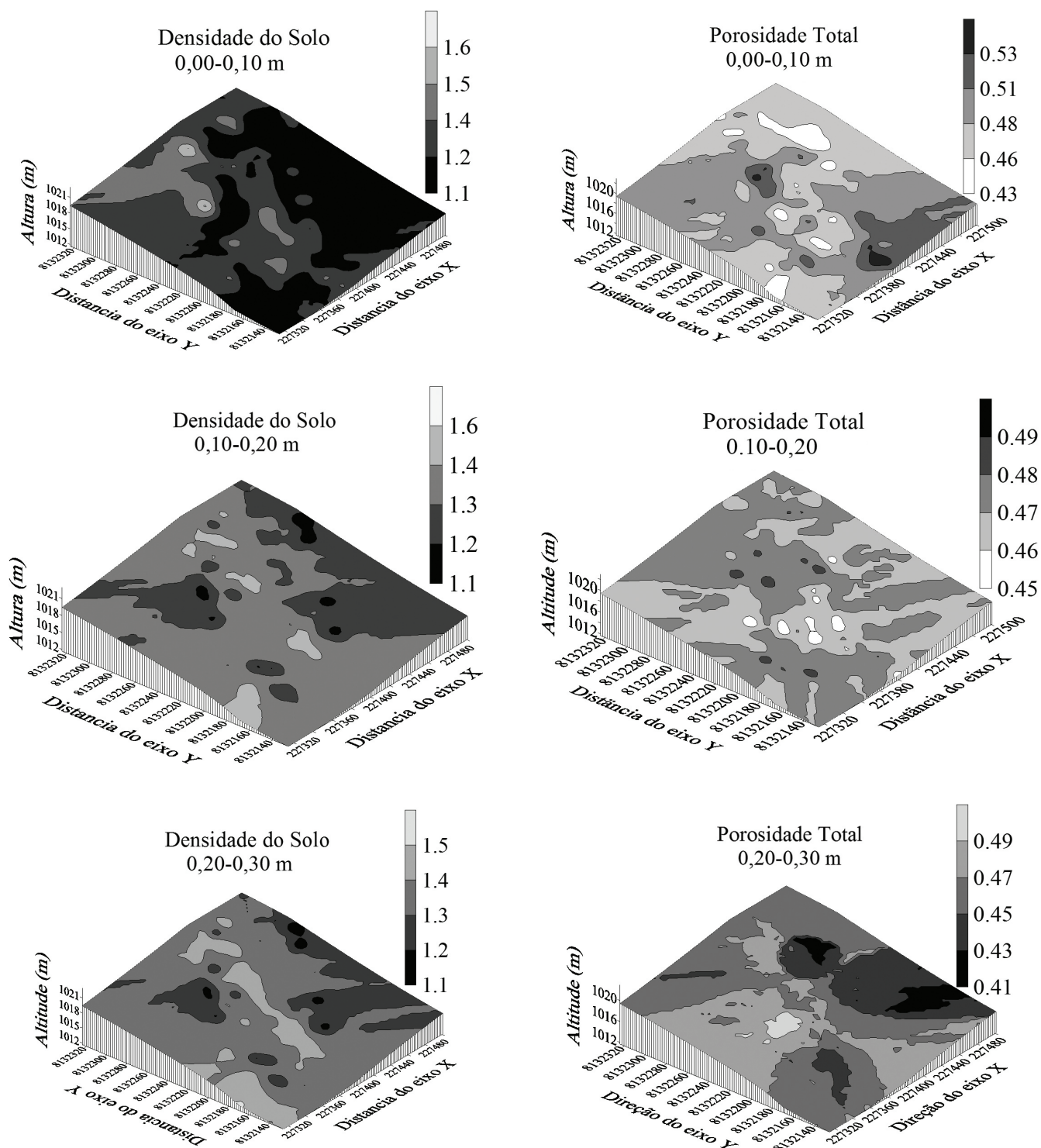


Figura 3. Variabilidade espacial de densidade do solo e porosidade total em um Argissolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de feijão no sistema plantio direto em Cristalina-GO, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Figure 3. Spatial variability of soil density and porosity on a Ultisol bean cultivation in no tillage system in Cristalina-GO at depths of 0.00-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m.

açúcar considerando aspectos solo-relevo, observaram menores valores para a densidade do solo na parte superior do terreno.

A análise dos mapas de macroporosidade na profundidade de 0,00-0,10 m mostra que a classe dominante é da ordem de 0,16 a 0,18 m³ m⁻³ (Figura 4). No terço superior,

verificaram-se os menores valores de macroporosidade nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, enquanto os maiores valores foram observados no terço inferior da encosta. Concordando com os dados obtidos por Souza et al. (2004), sendo que os autores afirmam que a identificação de

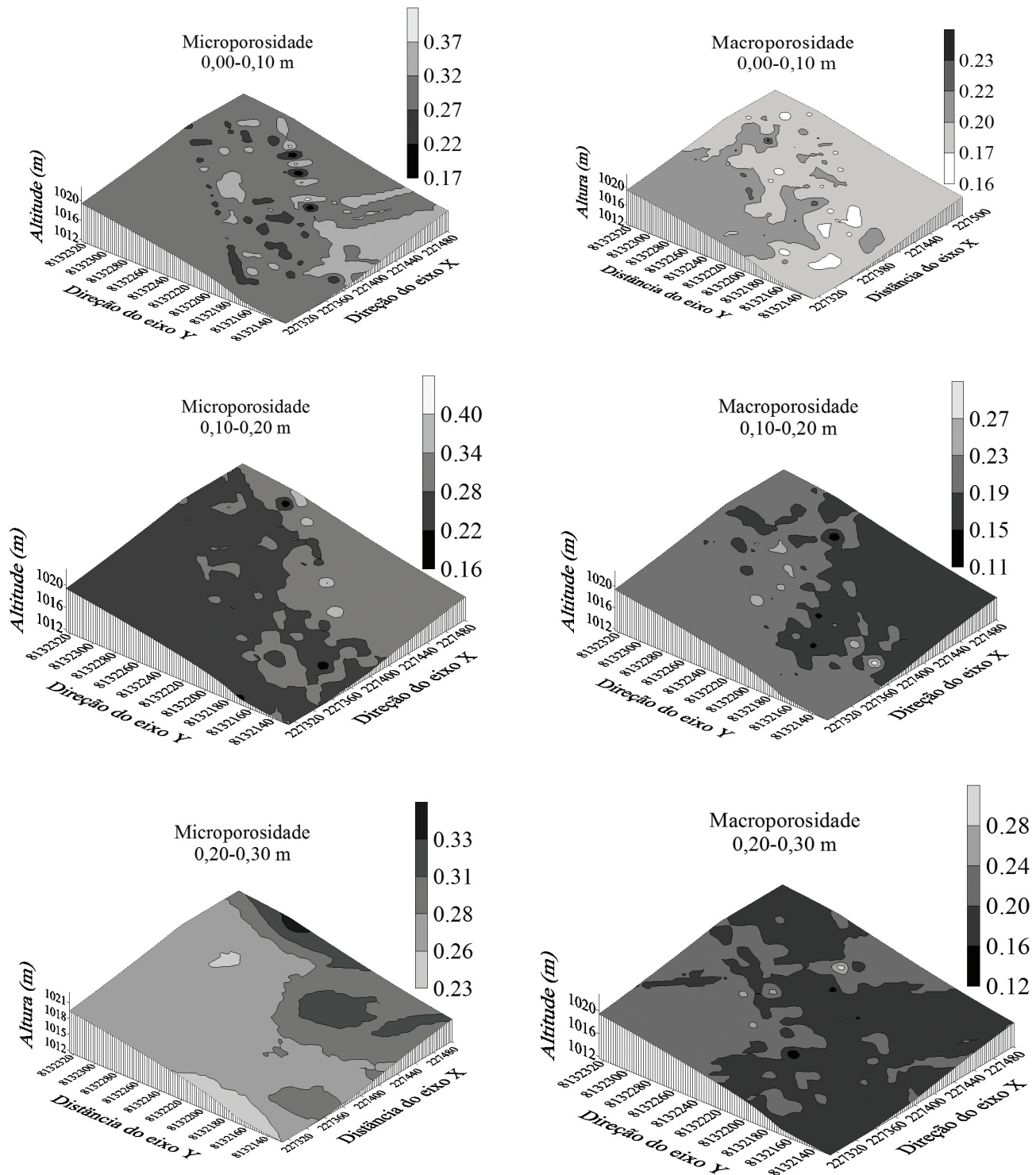


Figura 4. Variabilidade espacial da microporosidade e macroporosidade do solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de feijão no sistema plantio direto em Cristalina-GO, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Figure 4. Spatial variability of soil macroporosity and microporosity on a Ultisol bean cultivation in no tillage system in Cristalina-GO at depths of 0.00-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m.

compartimentos da paisagem na área de estudo mostrou-se muito eficiente na compreensão das causas da variabilidade espacial dos atributos estudados. Pequenas variações nas formas do relevo condicionam variabilidade diferenciada para os atributos físicos do solo.

Na análise dos mapas de porosidade total na profundidade de 0,00-0,10 m (Figura 4), observa-se que, no terço superior na posição oeste, há predominância dos valores de porosidade total da ordem de 0,43 a 0,45 m³ m⁻³; na posição leste, os valores estão entre 0,48 e 0,50 m³ m⁻³ (Figura 4). Do terço médio, os valores estão na ordem de 0,43 a 0,48 m³ m⁻³. Na profundidade de 0,10-0,20 m, os valores predominantes variaram de 0,46 a 0,47 m³ m⁻³ da posição leste a oeste. Na profundidade de 0,20-0,30 m, os valores predominantes são da ordem de 0,43 a 0,46 m³ m⁻³. Verifica-se que os valores de porosidade total aumentam no perfil do solo. Souza et al. (2004), estudando a variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar, verificaram maior porosidade total nas partes mais baixas do terreno.

4 Conclusões

Os efeitos combinados da ação mecânica da água advinda do sistema de irrigação, da geoforma e do estado de carga elétrica do solo, predominantemente negativa, favoreceram o alto grau de dispersão da argila, implicando alterações de atributos dependentes da relação de massa e volume dos constituintes do solo estudado. Alterações e aumento da relação massa e volume do solo, em especial na camada de 0,00-0,20 m, prejudicaram o crescimento do sistema radicular do feijoeiro. O método geoestatístico mostrou-se uma ferramenta eficiente na avaliação da variabilidade espacial dos atributos de solo e planta em função da geoforma e do método de irrigação empregado neste estudo.

Referências

APOLINO, J. N. S.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G.; LIMA, G. F. W. Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo sob diferentes sistemas e uso de manejo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, p. 126-136, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *ABNT-NBR 9898*: preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro, 1987.

BIELDERS, C. L.; GRAYMONPREZ, B. Raindrop impact: a neglected but potentially major contributor to particle mobilization in soils. *Soil Science Society American Journal*, v. 74, n. 5, p. 1446-1456, 2010. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2009.0245>

BRITO, L. F.; SOUZA, Z. M.; MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAZETTA, D. A.; CALZAVARA, S. A.; OLIVEIRA, M. J. C. Influência de formas de relevo em atributos físicos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, v. 36, n. 6, p. 1749-1755, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782006000600013>

CAMBRERA-MARTINEZ, F.; HARRIS, W. G.; CARLISLE, V. W.; COLLINS, M. E. Partitioning of clay-sized minerals in coastal plains soils with sandy/loamy boundaries. *Soil Science Society of American Journal*, v. 53, n. 5, p. 1584-1587, 1989. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1989.036159950053000500048x>

CAMPOS, C. C. M.; RIBEIRO, R. M.; SOUZA JUNIOR, V. S.; RIBEIRO RILHO, M. R.; ALMEIDA, M. C. Relações solo-superfície geomórfica em uma topossequência várzea terra firme na região de Humaitá (AM). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 2, p. 325-336, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000200002>

CHAVES, L. H. G.; QUEIROZ, M. F.; OLIVEIRA, E. L.; SANTANA, E. F. Efeito do carbonato de cálcio na dispersão da argila de um latossolo. *Agropecuária Técnica*, v. 36, p. 1-7, 1997.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Calagem e as propriedades eletroquímicas e físicas de um Latossolo em plantio direto. *Ciência Rural*, v. 34, n. 1, p. 281-284, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782004000100045>

DANTAS, J. D. N.; DANTAS, J. D. N.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ASSIS, C. P. Qualidade do solo sob diferentes usos e manejos no perímetro irrigado de Jaguaribe/Apodi, CE. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, p. 18-26, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas do Solos, 2011. 230 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS - EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro, 2013. 141 p.

FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; SILVA, E. A. A.; JOHANN, J. A.; BORSSOI, J. A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 32, n. 2, p. 463-476, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000200001>

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; CENTURION, J. F.; BARBOSA, G. F. Variabilidade espacial da produtividade do feijão em um Latossolo Vermelho distroférrico sob preparo convencional e plantio direto. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 27, n. 1, p. 61-67, 2005. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v27i1.1924>

FREDDI, O. S.; FERRAUDO, A. S.; CENTURION, J. F. Análise multivariada na compactação de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 32, n. 3, p. 953-961, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300005>

FUJIWARA, M.; KURACHI, S. A. H.; ARRUDA, F. B.; PIRES, R. C. M.; SAKAI, E. *A técnica de estudo de raízes pelo método do trado*. Campinas: Instituto Agrônomo, 1994. 9 p. (Boletim Técnico, 153).

GOLDEN SOFTWARE. *Surfer for windows: release 7.0: contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers user's guide*. New York, 1999. 619 p.

HELALIA, A. M.; LETEY, J.; GRAHAM, R. C. Crust formation and clay migration effects on infiltration rate. *Soil Science Society*, v. 52, n. 1, p. 251-255, 1998. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200010044x>

MICHELON, C. J. *Qualidade física dos solos irrigados do Rio Grande do Sul e do Brasil Central*. 2005. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; MELO, G. L.; SPOHR, R. B.; ANDRADE, J. G. Qualidade física dos solos

- irrigados de algumas regiões do Brasil Central. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 1, p. 39-45, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000100006>
- NEYKOVA, N.; OBANDO, J.; SCHNEIDER, R.; SHISANYA, C.; THIELE-BRUNH, S.; THOMAS, F. M. Vertical root distribution in single-crop and intercropping agricultural systems in Central Kenya. *Journal Plant of Nutrition Soil Science*, v. 174, n. 5, p. 742-749, 2011. <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.201000314>
- PEREIRA, L. S.; VALERO, J. A. J.; BUENDÍA, M. R. P.; MARTÍN-BENITO, J. M. T. *El riego y sus tecnologías*. Albacete: CREA-UCLM, 2010. 296 p.
- ROBERTSON, G. P. *GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide*. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152 p.
- SÁNCHEZ, P. A. *Properties and management of soils in the tropics*. New York: John Wiley & Sons, 1976. 618 p.
- SANTOS, D.; SOUZA, E. G.; NÓBREGA, L. H. P.; BAZZI, C. L.; GONÇALVES JUNIOR, A. C. Variabilidade espacial de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 8, p. 843-848, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000800005>
- SCHLOTZHAYER, S. D.; LITTELL, R. C. *SAS: system for elementary statistical analysis*. 2nd ed. Cary, 1997. 905 p.
- SECRETARIA DE GESTÃO E PLANEJAMENTO DO ESTADO DE GOIÁS - SEGPLAN. *Levantamento da produção agrícola do feijão no Estado de Goiás*. Goiânia, 2012. 21 p.
- SILVA, L. M.; LEMOS, L. B.; CRUSCIOL, C. A. C.; FELTRAN, J. C. Sistema radicular de cultivares de feijão em resposta a calagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, n. 7, p. 701-707, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2004000700012>
- SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F. Variabilidade espacial da densidade e porosidade de um Latossolo Vermelho eutroférico sob semeadura direta por vinte anos. *Bragantia*, v. 68, n. 3, p. 751-759, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052009000300023>
- SORACCO, C. G.; LOZANO, L. A.; BALBUENAI, R.; RESSIA, J. M.; FIGUEIRA, R. R. Contribution of macro porosity to water flux of a soil under different tillage systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 4, p. 1149-1156, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000400009>
- SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. C. Variabilidade especial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 8, n. 1, p. 51-58, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662004000100008>
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, G. R. (Ed.). *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54. (v. 1).
- VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 6, p. 1271-1280, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000600006>
- 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 Press, 1980. p. 319-344. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-348580-9.50018-3>

Contribuição dos autores: Guilherme Adalberto Ferreira Castione e Reginaldo Barboza Silva realizaram as coletas de solo do experimento, revisão bibliográfica e a escrita científica; Milton César Costa Campos e Zigomar Menezes de Souza contribuíram na análise estatística, revisão bibliográfica, escrita científica correções técnica e gramatical do trabalho.

Agradecimentos: Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP o financiamento da pesquisa.

Fonte de financiamento: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP.

Conflito de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.