

## VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HIDRÁULICOS DO SOLO EM UMA ÁREA E ESTIMATIVA DA LÂMINA DE IRRIGAÇÃO DE PRECISÃO

LAVITO LUIZ CERESOLI<sup>1</sup>; LUIZ RICARDO SOBENKO<sup>2</sup>; BRIANE KREITLOV E SILVA<sup>3</sup> E ROBSON ANDRÉ ARMINDO<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Eng. Agrônomo, UFPR; Curitiba, PR, Brasil.

<sup>2</sup> Doutorando em Engenharia de Sistemas Agrícolas, ESALQ/USP, Piracicaba, SP, Brasil.

<sup>3</sup> Mestranda em Ciência do Solo, UFPR, Curitiba, PR, Brasil.

<sup>4</sup> Professor Associado, Núcleo de Atividades de Engenharia e Biossistemas (NAEB), DSEA-UFPR, Curitiba, PR, Brasil. E-mail: [rarmindo@gmail.com](mailto:rarmindo@gmail.com) (autor correspondente).

### 1 RESUMO

Neste trabalho, teve-se como objetivo apresentar duas estratégias de gerenciamento de lâminas de irrigação de precisão a partir da análise dos atributos físico-hidráulicos do solo e da evapotranspiração da cultura do milho de uma área agrícola localizada no município de Sorriso-MT. Os atributos físicos do solo têm grande importância para o dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação, em projetos onde se busca eficiência e adequada operação. Os atributos analisados da área foram: textura, densidade do solo e das partículas, porosidade total e de aeração, carbono, condutividade hidráulica e retenção de água no solo. Por meio dos resultados foram recomendados quatro mapas temáticos de lâminas de irrigação de precisão, sendo um a partir da variabilidade espacial (v.e.) da capacidade de água disponível (CAD), outro a partir da v.e. da água facilmente disponível (AFD) e os dois últimos a partir da correlação positiva dos mapas de classes dos atributos físico-hidráulicos do solo com os mapas de CAD e AFD.

**Palavras-chave:** geoestatística; capacidade de água disponível; zona de manejo

CERESOLI, L. L.; SOBENKO, L. R.; SILVA, B. K.; ARMINDO, R. A.  
SPATIAL VARIABILITY OF SOIL HYDRAULIC PROPERTIES AND IRRIGATION  
PRECISION DEPTH DETERMINATION

### 2 ABSTRACT

This study aimed to present two strategies for managing irrigation precision. These strategies were based on hydraulic soil physical attributes and on corn evapotranspiration. The study was conducted an agricultural area located in Sorriso city, Mato Grosso state, Brazil. Texture, bulk and particle densities, porosity and air-filled porosity, carbon, hydraulic conductivity and water retention were analyzed in this area. By the results, four thematic maps of irrigation precision were recommended, one from the spatial variability (s.v.) of the available water capacity (AWC), another from readily water range s.v. (RAW) and the last two between the positive correlation of physical attributes maps and of AWC and RAW maps.

**Keywords:** geostatistics, available water capacity, and management zone.

### 3 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos ligados aos recursos naturais trouxeram grandes mudanças no manejo agrícola, proporcionando muitos benefícios à sociedade. Entretanto, essas mudanças também trouxeram problemas, como a utilização inadequada dos recursos naturais, principalmente da água e do solo prejudicando os ecossistemas naturais por meio do aumento da degradação ambiental, e a redução da qualidade de vida (BECHARA et al., 2007).

Devido ao decréscimo da disponibilidade de água para a agricultura, aos altos consumo e custo de energia (LÓPEZ-MATA et al., 2010) e a crescente preocupação com os recursos hídricos, faz-se necessária a adoção de estratégias de manejo que visem a economia de água sem prejudicar a produtividade das culturas que necessitam de irrigação (MANTOVANI et al., 2013). Tal necessidade pode ser suprida pela irrigação de precisão, que visa como estratégia à aplicação de água de maneira não uniforme, para corresponder a qualquer variação do solo e da cultura (DACCACHE et al., 2014).

Entre todos os métodos de irrigação existentes pode-se citar o de aspersão, que reproduz artificialmente a chuva por meio dos aspersores (ARMINDO et al., 2012). O método se divide em aspersão convencional e mecanizado, sendo que o último é disposto de equipamentos como o pivô central, canhão autopropelido, sistema linear de irrigação, entre outros.

Para Silva et al. (2000), os atributos físico-hidráulicos do solo têm influência direta no desenvolvimento radicular das plantas, e assim, na sua produtividade. Logo, o estudo da variabilidade espacial desses atributos visa o melhor entendimento de seus comportamentos para a irrigação de precisão. Para Reichardt et al. (2001), a estimativa da lâmina de irrigação considerando-se apenas a evapotranspiração da cultura fundamenta a aplicação de uma lâmina média para a toda a área não contemplando os atributos do solo e, também, a própria irrigação de precisão. Textura, densidade do solo e das partículas, porosidade, condutividade hidráulica, retenção de água, entre outros, são atributos comumente analisados nessas condições (FERREIRA, 2010). Havendo adequados níveis de porosidade no solo, a resposta à fertilidade, absorção de nutrientes e drenagem é positiva no desenvolvimento da cultura (HILLEL, 1972; MARQUES et al., 2002).

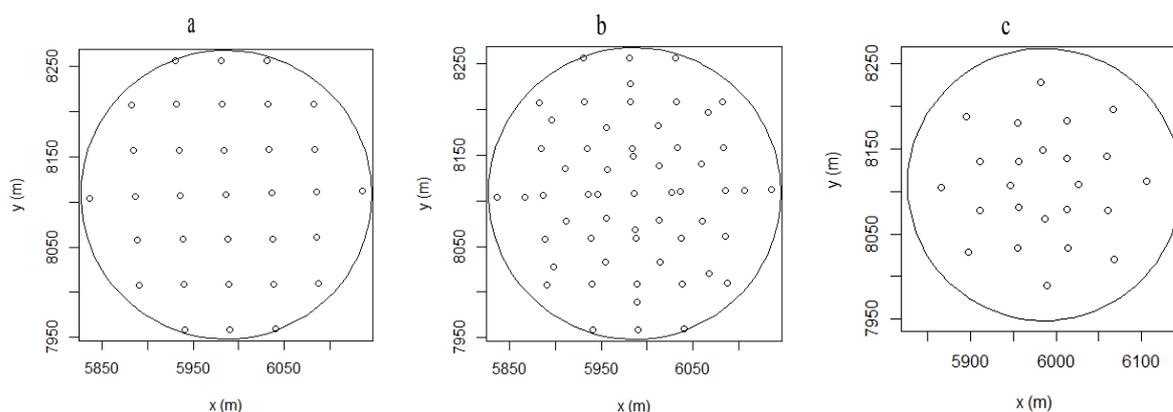
A prática de se determinar unidades de gerenciamento, ou zonas de manejo, para a aplicação de lâminas de irrigação em taxa variada tem se tornado realidade minimizando-se as perdas na aplicação de água, entretanto, mantendo-se os níveis necessários de produção (ARMINDO et al., 2010; DACCACHE et al., 2014). Assim, estratégias para estabelecer unidades de gerenciamento têm sido apresentadas, como por exemplo a de Hedley e Yule (2009). A partir de um critério estatístico, Jang et al. (2012) estabeleceram uma estratégia de gerenciamento de irrigação de precisão a fim de garantir a sustentabilidade do aquífero, baseando-se na variabilidade espacial da qualidade e da quantidade da água armazenada no solo. Para isso, esses autores consideraram a variabilidade espacial da geografia, hidrologia e hidrogeologia da área de estudo. Neste trabalho, teve-se por objetivo apresentar estratégias de unidades de gerenciamento de lâminas de irrigação de precisão, por pivô central, para a cultura do milho em solo Franco Arenoso em uma área do estado do Mato-Grosso.

### 4 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na Fazenda Piva, localizada na gleba Barreiro, município de Sorriso-MT. Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (1936), o clima é caracterizado como tropical, com estação seca no inverno. Depois de determinada a área de

estudo, realizou-se a localização dos pontos amostrais e, em seguida, a marcação desses no campo. Utilizou-se o espaçamento amostral regular de 50 m para amostras de densidade das partículas ( $\rho_p$ ), densidade do solo seco ( $\rho_s$ ), porosidade total ( $\alpha$ ) e carbono (C), e de 40 m para amostras de condutividade hidráulica na saturação do solo (K) (Figura 1). Esses espaçamentos proporcionaram 33 valores médios para textura,  $\rho_p$ ,  $\alpha$  e C, 57 para  $\rho_s$  e 24 para K, todos resultados de três repetições.

**Figura 1.** Grids amostrais para a determinação de: a) textura, densidade das partículas, porosidade total e carbono; b) densidade do solo seco; c) condutividade hidráulica na saturação do solo.



Coletaram-se amostras não deformadas em anéis volumétricos para determinação de  $\rho_s$  e  $\alpha$ , e de amostras deformadas para determinação de textura, C e  $\rho_p$ . As análises físico-hidráulicas do solo foram realizadas nas dependências do Núcleo de Atividades de Engenharia de Biosistemas (NAEB), da Universidade Federal do Paraná (UFPR). A análise textural foi realizada seguindo a metodologia do densímetro (GEE e OR, 2002) e a classificação por meio do diagrama triangular de classes texturais, adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS). A determinação dos valores de  $\rho_p$  foi realizada com terra fina seca em estufa pelo método do balão volumétrico, já os valores de K foram determinados pelo método do permeâmetro de carga constante e os de C pelo método colorimétrico (QUAGGIO e van RAIJ, 1979). A curva de retenção da água no solo foi ajustada seguindo o modelo de van-Genuchten (1980), Equação 1.

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[ 1 + (\lambda \cdot |\psi_m|)^n \right]^{1-1/n} \quad (1)$$

em que  $\theta$  é a umidade volumétrica ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $\theta_r$  e  $\theta_s$  são as umidades volumétricas residual e na saturação do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $\psi_m$  é o potencial mátrico da água no solo (cm) e  $n$  e  $\lambda (\text{cm}^{-1})$  são parâmetros de ajuste do modelo.

Realizou-se a determinação da  $\alpha$  pela diferença entre a unidade e a razão  $\rho_s/\rho_p$  e a porosidade de aeração do solo ( $\alpha_{ar}$ ) pela diferença entre  $\alpha$  e a umidade volumétrica na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ). Já a  $\theta_{cc}$  foi obtida a partir do critério de que essa é atingida quando a taxa de drenagem do solo torna-se negligenciável  $[(\partial\theta/\partial t) \rightarrow 0]$ , proposta por Loyola e Prevedello (2003) e modificada por Andrade e Stone (2011), Equação 2.

$$\theta_{cc} = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left( p^{\frac{1,5n + 0,5}{0,5 - 2,5n}} \right)^{\frac{1-n}{1,5n + 0,5}} \quad (2)$$

em que  $p$  é a taxa relativa de drenagem, 1%.

Valendo-se da Equação 1, determinou-se a umidade no ponto de murchamento permanente ( $\theta_{pmp}$ ) a partir do potencial mátrico de 15000 hPa. Com os valores de  $\theta_{cc}$  e  $\theta_{pmp}$ , determinou-se a capacidade de água disponível (CAD) valendo-se da expressão [  $CAD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp})z$  ] e da profundidade efetiva do sistema radicular do milho de 0,4 m, medida no local de estudo. Com a evapotranspiração do milho para a cidade de Sorriso-MT (7 mm dia<sup>-1</sup>), determinou-se o fator de disponibilidade da cultura (DOORENBOS e KASSAM, 1979) em 0,45 e, em seguida, a água facilmente disponível no solo (AFD), como uma fração da CAD (De JONG van LIER, 2010).

Depois de realizada a análise das amostras e a obtenção dos dados, utilizou-se o *software R* (R CORE TEAM, 2014) e o pacote *geoR* (RIBEIRO JUNIOR & DIGGLE, 2001) para análise estatística dos resultados. Nas análises, utilizaram-se os critérios da Máxima Verossimilhança (ML) e da Máxima Verossimilhança Restrita (RML), a partir dos modelos Esférico (esf), Exponencial (exp), Gaussiano (gaus), Matérn com  $kappa$  igual a 1,5 (M1,5) e Matérn com  $kappa$  igual a 2,5 (M2,5). A partir do critério de validação cruzada, escolheu-se o melhor modelo para interpolação por krigagem (FARACO et al., 2008), a partir dos menores valores de *akaike information criterion* (AIC) e, em caso de empate, maiores valores de *bayesian information criterion* (BIC), para a geração dos mapas temáticos dos atributos físico-hidráulicos do solo, bem como das unidades de gerenciamento das lâminas de irrigação da área de estudo.

Duas estratégias de unidades de gerenciamento das lâminas de irrigação foram apresentadas dividindo-as em: *i*) dois mapas de tratamento que consideram as lâminas de irrigação em igualdade a CAD e a AFD; *ii*) dois mapas de tratamento propondo-se o cálculo das lâminas de irrigação, Equação 3, a partir dos valores de correlação positiva entre os atributos principais, CAD e AFD, e os demais atributos físico-hidráulicos do solo. Essas duas estratégias adotadas possibilitaram a geração de quatro mapas de lâminas de irrigação de precisão para a área de estudo. Na segunda estratégia, assim como feito por Ko e Piccinni (2008), uma tabela de correlação de Pearson ( $r$ ) entre os atributos físico-hidráulicos do solo, bem como a variabilidade espacial desses, foi realizada.

$$LLI = \sum_{i=1}^n \left[ AFH_i \cdot (r_{AFH_p(AFH_i)})^{-1} \right] / \sum_{i=1}^n \left[ r_{AFH_p(AFH_i)} \right]^{-1}, \quad r > 0 \quad (3)$$

em que LLI é a lâmina líquida de irrigação (mm),  $AFH_i$  são valores obtidos a partir do mapa do atributo físico-hidráulico e  $r_{AFH_p(AFH_i)}$  é o valor da correlação positiva entre o atributo físico-hidráulico principal e o atributo físico-hidráulico analisado.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um resumo estatístico descritivo de todas as variáveis em estudo foi realizado possibilitando a análise exploratória dos resultados (Tabela 1). Seguindo o critério de Warrick e Nielsen (1980), os atributos  $\rho_s$ ,  $\rho_p$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha_{ar}$  e areia apresentaram baixo CV, com valores menores que 12%. Entretanto, os atributos silte, argila e K apresentaram alto CV, com valores maiores que 24%. Os demais atributos avaliados apresentaram CV entre 12 e 24%.

**Tabela 1.** Estatística descritiva dos atributos físico-hidráulicos do solo.

Atributo	média	N	S <sup>2</sup>	CV	min	1°Q	med	3°Q	max	AS	Kurt
$\rho_p$	2603	33	10505	3,938	2356	2565	2598	2634	2845	-0,177	0,432
$\alpha$	0,482	33	0,003	11,36	0,359	0,475	0,475	0,518	0,598	0,167	-0,212
Areia	69,60	33	38,00	8,857	58,80	65,00	70,00	75,00	77,50	-0,315	-1278
Silte	13,70	33	14,40	27,70	7,500	11,30	13,80	16,30	22,50	0,270	-0,757
Argila	16,80	33	31,40	33,35	7,500	13,80	15,00	20,00	30,00	0,679	-0,477
CAD	50,40	33	44,90	13,30	39,00	45,70	49250	54460	67210	0,435	-0,316
C	17,50	33	16,50	23,21	10,50	15,30	17,20	19,20	30,70	1054	1821
K	89,70	24	9861	110,7	4,800	34,10	50,10	127,5	423,8	1937	3372
$\rho_s$	1312	57	24609	11,96	844,1	1222	1326	1415	1689,3	-0,510	0,469
$\alpha_{ar}$	0,270	33	0,001	11,71	0,225	0,245	0,263	0,291	0,349	0,756	-0,130
AFD	22,70	33	9,100	13,29	17,50	20,60	22,20	24,50	30,20	0,435	-0,316

N: número de observações; S<sup>2</sup>: variância; CV: coeficiente de variação, %; min: valor mínimo; med: mediana; 1° Q: primeiro quartil; 3° Q: terceiro quartil; max: valor máximo; AS: Assimetria; Kurt: curtose;  $\rho_p$ : densidade das partículas, kg m<sup>-3</sup>;  $\alpha$ : porosidade total, m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>; CAD: capacidade de água disponível, mm; C: carbono, kg m<sup>-3</sup>; K: condutividade hidráulica na saturação, mm h<sup>-1</sup>;  $\rho_s$ : densidade do solo, kg m<sup>-3</sup>;  $\alpha_{ar}$ : porosidade de aeração, m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>; AFD: água facilmente disponível, mm.

As semivariâncias de C, originadas de espaçamento regular de 50 m, não apresentaram variabilidade espacial por evidenciar comportamento aleatório em função da distância com efeito pepita puro para os métodos de ML e RML (Figura 1-“a”), assim como para os cinco modelos avaliados. Utilizando-se espaçamento regular de 10 m, Alho et al. (2014) encontraram variabilidade espacial para o teor de carbono no solo. Assim, os modelos Gaus, Exp, Esf, M1,5 e M2,5 foram ajustados aos resultados dentre os modelos avaliados (Tabela 2). Entre os atributos que apresentaram dependência espacial, determinou-se a correlação de Pearson dos mapas gerados (Tabela 3).

**Tabela 2.** Parâmetros dos modelos geoestatísticos ajustados e seus índices de estimativa aos valores dos atributos físico-hidráulicos do solo.

	$\rho_p$	$\alpha$	Areia	Silte	Argila	CAD	K	$\rho_s$	$\alpha_{ar}$
Modelo	Gaus	Gaus	Gaus	Exp	M1,5	M2,5	Gaus	Esf	Gaus
$\varphi_1$	0,000	0,002	5,190	12,30	0,878	36,16	0,161	15242	0,042
$\varphi_2$	10505	5E-04	151,0	467,0	11,40	59,47	11,49	9434	0,004
$\varphi_3$	37,40	130,0	374,0	38210	397,0	159,0	31,90	44,80	113,0
A	64,80	226,0	648,0	114467	1884	943,0	55,20	44,80	195,0
$\varphi_1/(\varphi_1+\varphi_2)$	0,000	0,839	0,033	0,026	0,071	0,378	0,014	0,618	0,905
EM	0,380	3E-05	0,045	0,004	-0,022	0,014	-2,20	0,075	-3E-05
ER	0,002	3E-04	0,008	0,006	-0,005	0,001	-0,06	3E-04	0,004
$S_{EM}$	98,30	0,055	2,550	3,780	4,220	6,480	78,30	158,0	0,032
$S_{ER}$	1,005	1,018	1,010	1,013	0,998	1,019	1,178	1,010	1,074
EA	2266	1,400	64,30	101,0	110,0	162,0	1276	6774	0,839
AIC	393,0	-88,0	165,0	183,0	193,0	217,0	262,0	733,0	-130,0
BIC	399,0	-82,0	171,0	188,0	199,0	223,0	267,0	740,0	-124,0
$\lambda_{GR}$	1,000	1,000	1,000	1,000	0,500	1,000	0,300	1,000	-0,500

$\rho_p$ : densidade das partículas, kg m<sup>-3</sup>;  $\alpha$ : porosidade total, m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>; CAD: capacidade de água disponível, mm; K: condutividade hidráulica na saturação, mm h<sup>-1</sup>;  $\rho_s$ : densidade do solo seco, kg m<sup>-3</sup>;  $\alpha_{ar}$ : porosidade de aeração, m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>; AFD: água facilmente disponível, mm;  $\varphi_1$ : efeito pepita;  $\varphi_2$ : contribuição;  $\varphi_3$ : função do alcance; A: alcance, m; EM: erro médio; ER: erro médio relativo;  $S_{EM}$ : desvio padrão do erro médio;  $S_{ER}$ : desvio padrão do erro reduzido; EA: erro absoluto; AIC: *Akaike*; BIC: *Bayesian Information Criterion*;  $\lambda_{GR}$ : fator de transformação dos dados, valor unitário significa dados não transformados.

**Tabela 3.** Valores da correlação de Pearson dos atributos físico-hidráulicos do solo.

	$\rho_p$	$\alpha$	Areia	Silte	Argila	CAD	K	$\rho_s$	$\alpha_{ar}$	AFD
$\rho_p$	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\alpha$	0,389*	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Areia	-0,362*	-0,367*	1	-	-	-	-	-	-	-
Silte	0,370*	0,399*	-0,966*	1	-	-	-	-	-	-
Argila	0,348*	0,344*	-0,996*	0,965*	1	-	-	-	-	-
CAD	-0,147*	0,303*	0,756*	-0,720*	-0,764*	1	-	-	-	-
K	0,017	-0,232*	0,048*	-0,072*	-0,050*	-0,070*	1	-	-	-
$\rho_s$	0,039**	-0,237*	0,109*	-0,071*	-0,099*	-0,032	-0,450*	1	-	-
$\alpha_{ar}$	0,077*	0,654*	0,432*	-0,373*	-0,468*	0,863*	-0,1485*	-0,157*	1	-
AFD	-0,1466*	0,303*	0,756*	-0,720*	-0,764*	1,000*	-0,070*	-0,032	0,863*	1

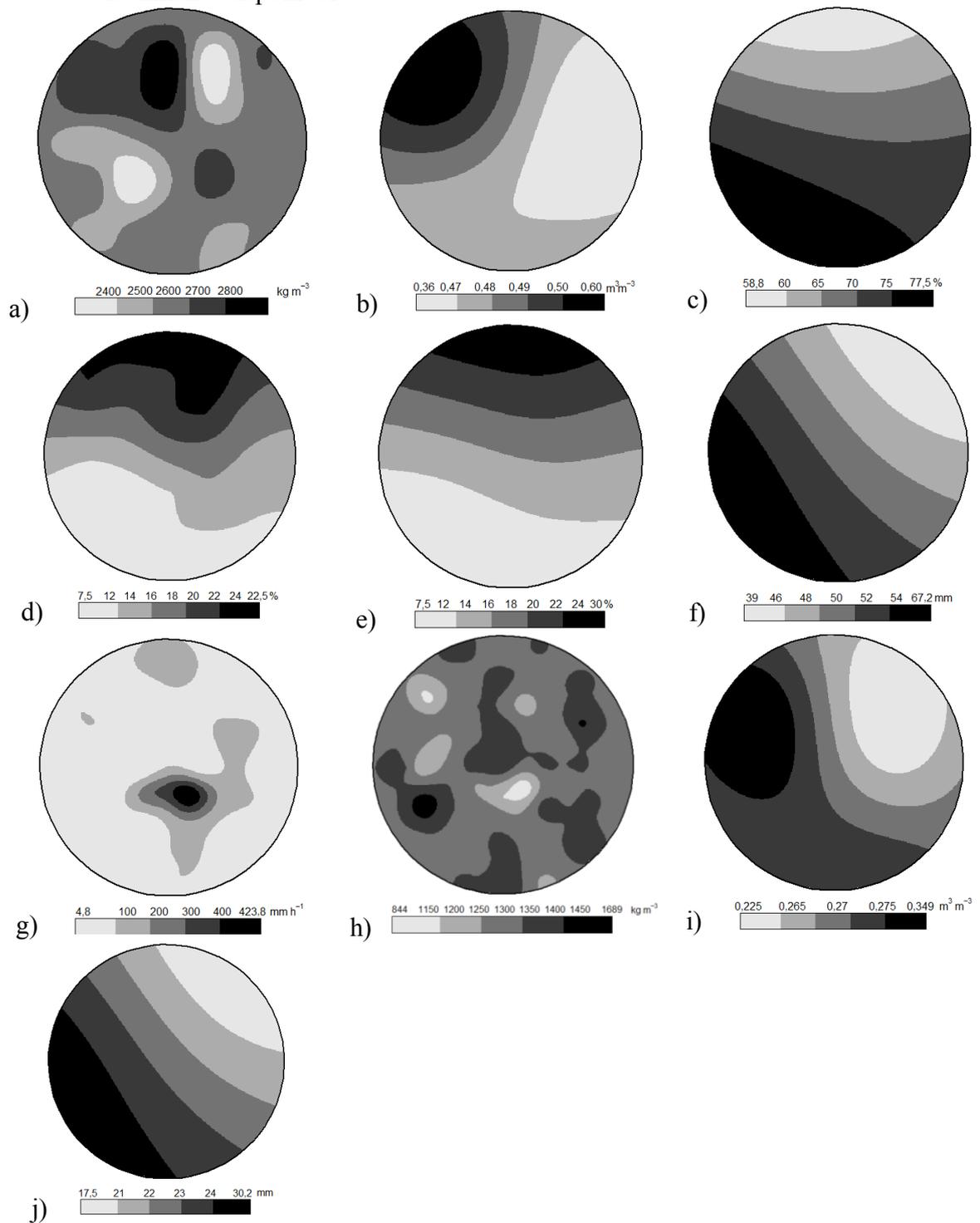
\*significativo para  $p < 0,01$ ; \*\*significativo a  $p < 0,05$ ;

$\rho_p$ : densidade das partículas;  $\alpha$ : porosidade total; CAD: capacidade de água disponível; K: condutividade hidráulica na saturação do solo;  $\rho_s$ : densidade do solo seco;  $\alpha_{ar}$ : porosidade de aeração; AFD: água facilmente disponível.

A  $\rho_p$  foi pouco influenciada pelo teor de matéria orgânica (Figura 2 - “a”), já que seu resultado médio não foi distante da média de 2650 kg m<sup>-3</sup> para partículas minerais dos solos (PREVEDELLO e ARMINDO, 2015). A variabilidade espacial encontrada para  $\alpha$  mostrou-se adequada (Figura 2 - “b”), dentro da faixa de 0,30 a 0,55 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> para solos francos, sugerida por Prevedello e Armindo (2015). O sistema poroso tem grande importância no movimento e armazenamento de água no solo, interferindo no sistema radicular das plantas, no fluxo e

retenção de calor e na resistência mecânica do solo (FERREIRA, 2010). A maior parte das amostras de textura analisadas, 72,7%, foi classificada na classe Franco Arenosa, resultando em mapas temáticos de areia, silte e argila (Figuras 2 - “c”, “d” e “e”).

**Figura 2.** Mapas temáticos dos dados: a) densidade das partículas; b) porosidade total; c) areia; d) silte; e) argila; f) capacidade de água disponível; g) condutividade hidráulica na saturação do solo; h) densidade do solo seco; i) porosidade de aeração; j) água facilmente disponível.



Com os resultados obtidos de  $K$  e  $\rho_s$ , obteve-se uma correlação inversa não linear entre esses atributos, corroborando com Stone et al. (2002), do tipo exponencial ( $K = 12315,4e^{-0,0041 \cdot \rho_s}$ ,  $r = 0,7872$ ). A  $K$  está correlacionada com a qualidade estrutural do solo, estando ligada a geometria e a continuidade dos poros preenchidos com água (MESQUITA e MORAES, 2004). O mesmo comportamento de correlação inversa foi observado entre a porcentagem de areia e de argila (LEAO et al., 2010) em seus mapas (Figura 2 - “c” e “e”).

O mapa da CAD apresentou classes entre 45 e 55 mm (Figura 2 - “f”), com valor mínimo de 15,47 mm, logo altas intensidades de irrigação ou chuva podem completar rapidamente a CAD do solo, propiciando percolação e, posteriormente, problemas originados do escoamento superficial (BESKOW et al., 2013). No caso do pivô central, a velocidade de deslocamento do equipamento deve ser adequada à realidade da variabilidade dos resultados de CAD (ARMINDO et al., 2010).

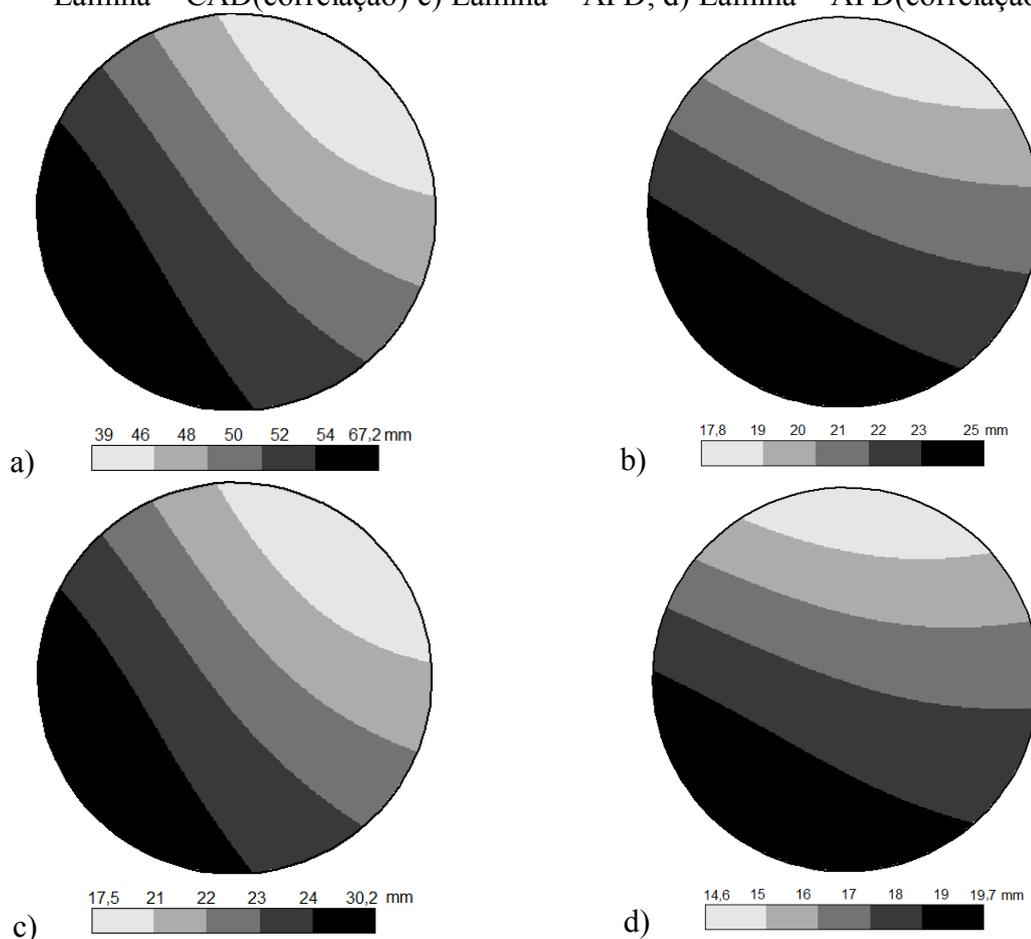
Com os resultados dos *pixels* dos mapas de CAD, AFD e gerados pela Equação 3 realizou-se a análise geoestatística para a determinação dos mapas de tratamento (Tabela 4). Os mapas temáticos das unidades de gerenciamento de lâminas de irrigação a partir das duas primeiras estratégias, valores de CAD e AFD, apresentaram a mesma diferenciação de classes, porém com valores distintos, confirmando a única diferença entre essas variáveis, ou seja, o fator de disponibilidade da cultura (DOORENBOS e KASSAM, 1979) (Figura 2 - “f” e “j”). Já os mapas temáticos gerados a partir das duas últimas estratégias, pela Equação 3, são referentes aos valores de correlação positiva entre a CAD e os atributos, para essa área estudada, porosidade, areia e porosidade de aeração (Figura 3 - “b”), sendo os mesmos correlacionados com o valor da AFD (Figura 3 - “d”). Observou-se assim semelhança entre esses mapas, com diferenciação nas classes de lâmina líquida devido ao fator de disponibilidade da cultura utilizado. Ressalta-se que os mapas de gerenciamento da lâmina de irrigação de precisão apresentados se referem a valores de lâmina líquida de irrigação (LLI), sendo assim, para a aplicação da lâmina bruta de irrigação (LBI), torna-se necessário o conhecimento da eficiência do sistema de irrigação a ser utilizado. Como fator de disponibilidade da cultura varia em função das condições climatológicas e da cultura trabalhada, o uso de sensores ou outras tecnologias de determinação da umidade do solo com precisão e rapidez pode ser uma alternativa, complementando assim a prática de irrigação de precisão (CARDENAS-LAILHACAR e DUKE, 2010).

**Tabela 4.** Índices de estimativa do Método RML e Modelo Matérn ( $\kappa = 2,5$ ) aos valores das lâminas líquidas de irrigação (LLI) para as duas estratégias de unidades de gerenciamento apresentadas.

	LLI <sub>CAD</sub>	LLI <sub>CAD(AFH)</sub>	LLI <sub>AFD</sub>	LLI <sub>AFD(AFH)</sub>
$\varphi_1$	36,16	1,330	7,322	0,506
$\varphi_2$	59,47	36,74	12,04	22,83
$\varphi_3$	159,47	274,21	154,47	254,69
A	943,84	1623,0	943,84	1507,44
$\varphi_1/(\varphi_1+\varphi_2)$	0,3781	0,0349	0,3781	0,0217
EM	0,0143	0,0078	0,0065	0,0088
ER	0,0011	0,0030	0,0011	0,0053
S <sub>EM</sub>	6,4818	1,2663	2,9168	0,7856
S <sub>ER</sub>	1,0193	1,0178	1,0193	1,0128
EA	162,15	33,634	72,968	21,497
AIC	217,29	116,15	166,19	87,806
BIC	223,28	122,13	172,17	93,792

$\varphi_1$ : efeito pepita;  $\varphi_2$ : contribuição;  $\varphi_3$ : função do alcance; A: alcance; EM: erro médio; ER: erro médio relativo; S<sub>EM</sub>: desvio padrão do erro médio; S<sub>ER</sub>: desvio padrão do erro reduzido; EA: erro absoluto; AIC: Akaike; BIC: Bayesian Information Criterion.

**Figura 3.** Mapas temáticos do gerenciamento das lâminas de irrigação: a) Lâmina = CAD; b) Lâmina = CAD(correlação) c) Lâmina = AFD; d) Lâmina = AFD(correlação).



## 6 CONCLUSÃO

Diante dos resultados apresentados e nas condições em que o trabalho foi realizado conclui-se que os atributos físico-hidráulicos avaliados na área de estudo, com exceção do carbono, apresentaram dependência espacial. A partir dessa variabilidade, estabeleceu-se a necessidade de se realizar a irrigação com tratamentos de lâminas localizados. Com isso, estabeleceram-se duas estratégias satisfatórias que permitiram gerar, como opções de escolha ao irrigante, quatro mapas de tratamento para irrigação de precisão para a cultura do milho.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.44, n.3, p.246-254, 2014.

ANDRADE, R. da S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.2, p.111-116, 2011.

ARMINDO, R. A.; SOUZA, J. L. M. de; SILVA, E. D. da; CASTAGNOLLI, K. P. Perfil radial, uniformidade e simulação de espaçamentos de aspersores que compõem sistemas de irrigação por aspersão convencional. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.6, n.2, p.63-73, 2012.

ARMINDO, R. A.; BOTREL, T. A.; GARZELLA, T.C. Flow rate sprinkler development for site-specific irrigation. **Irrigation Science**, Springer, v.29, n.29, p.1-8, 2010.

BECHARA, F. C.; CAMPOS FILHO, E.M.; BARRETOO, K.D.; GABRIEL, V.de A.; ANTUNES, A.Z.; REIS, A. Unidades Demonstrativas de Restauração Ecológica através de Técnicas de Nucleação de biodiversidade. **Revista Brasileira de Biociências**, Piracicaba, v.5, n.1, p.9-11, 2007.

BESKOW, S.; NORTON, L. D., MELLO, C. R. Hydrological prediction in a tropical watershed dominated by oxisols using a distributed hydrological model. **Water Resour Manage**. Online, v.27, n.2, p.341-363, 2013.

CARDENAS-LAILHANCAR, B.; DUKES, M.D. Precision of soil moisture sensor irrigation controllers under field conditions. **Agricultural Water Management**. Florida, v.97, n.2, p.666-672, 2010.

DACCACHE, A.; KNOX, J. W.; WEATHERHEAD, E. K.; DANESHKHAH, A.; HESS, T. M. Implementing precision irrigation in a humid climate – Recent experiences and on-going challenges. **Agricultural Water Management**, Bedfordshire, v.147, n.C, p.135-143, 2014.

De JONG van LIER, Q. Disponibilidade de água às plantas. In: Quirin de Jong van Lier. **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010, v.1, p. 283-298.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Roma: FAO, 1979, 193p.

FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; SILVA, E. 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 Ciência do Solo**. Cascavel, v.32, n.2, p.463-476, 2008.

FERREIRA, M. M. **Caracterização física do solo**. In: Quirin de Jong van Lier. **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010, v.1, p.1-27.

GEE, G.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J. H. & TOPP, C., eds. Methods of soil analysis: Physical methods. **Soil Science Society of America**, 2002, n.4, v.4, p.225– 289.

HEDLEY, C. B.; YULE, I. J. A method for spatial prediction of daily soil water status for precise irrigation scheduling. **Agricultural Water Management**. New Zealand, v.96, n.12, p.1737-1745, 2009.

HILLEL, D. **Soil and water: physical principles and processes**. New York: Academic, 1972. 288p.

JANG, C.; CHEN, S.; KUO, Y. Establishing an irrigation management plan of sustainable ground water based on spatial variability of water quality and quantity. **Agricultural Water Management**. Taiwan, v.414-415, n.11, p.201-210, 2012.

KO, J.; PICCINNI, G. Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation management. **Agricultural Water Management**, Chesterfield, v.96, n.2713, p.799-808, 2008.

KÖPPEN, W. **Grundriss der Klimakunde**: Outline of climate science. Berlin: Walter de Gruyter, 1931. 388p. LEAO, M. G. A.; MARQUES JR, J.; SOUZA, Z. M. de; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo sob cultivo de citros. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v.34, n.1, p.121-131, 2010.

LÓPEZ-MATA, E.; TARJUELLO, J.M.; JUAN, J.A.; BALLESTEROS, R.; DOMÍNGUEZ, A. Effect of irrigation uniformity on the profitability of crops. **Agricultural Water Management**, Albacete, v.98, n.1, p.190-198, 2010.

LOYOLA, J. M. T.; PREVEDELLO, C. L. Modelos analíticos para predição do processo da redistribuição da água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa. v.27, n.5, p.783-787, 2003.

MANTOVANI, E. C.; DELAZARI, F. T.; DIAS, L. E.; ASSIS, I.R.; VIEIRA, G. H. S.; LANDIM, F.M. Eficiência no uso da água de duas cultivares de batata-doce em resposta a diferentes lâminas de irrigação. **Horticultura Brasileira**, Vitória da Conquista, v.31, n.4, p.602-606, 2013.

MARQUES, J. D. de O.; LIBARDI, P. L.; De JONG van LIER, Q. de. Relação entre horizontes pedológicos e propriedades hidráulicas em dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 26, n.3, p.567-577, 2002.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.34, n.3, p.963-969, 2004.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do solo: com problemas resolvidos. 2.ed. rev. e ampl.** Curitiba. C. L. Prevedello, 2015. 474p.

QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B. van. Comparação de métodos rápidos para a determinação da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, n.3, v.3, p. 184-187, 1979.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2014. Disponível em :< <http://www.r-project.org/>> Acesso em 02 set. 2014.

REICHARDT, K.; SILVA, J. C. de A.; BASSOI, L. H.; TIMM, L. C.; OLIVEIRA, J. C. M. de; BACCHI, O. O. S.; PILOTTO, J. E. Soil spatial variability and the estimation of the irrigation water depth. **Ciência Agrícola**, Piracicaba, v.58, n.3, p.549-553, 2001.

RIBEIRO JUNIOR, P.J.; DIGGLE, P.J. geoR: a package from geostatistical analysis. **RNEWS**, v.1, n.2, p.15-18, 2001.

SILVA, R. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Comparação entre os métodos do cilindro e do torrão na determinação da porosidade e da densidade do solo. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.30, n.6, p.1065-1068, 2000.

STONE, L. F.; GUIMARAES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.6, n.2, p.207-212, 2002.

van GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**. v.44, p.892-898, 1980.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. Application of soil physics. New York, v.1, p.319-344, 1980.