

INTERPOLAÇÃO DOS PARÂMETROS DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO CONSIDERANDO DIFERENTES CAPACIDADES DE ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO

CASTRO, Fábio da Silveira¹
CECÍLIO, Roberto Avelino²
XAVIER, Alexandre Cândido²
PEZZOPANE, José Eduardo Macedo²
SPERANDIO, Huezer Viganô

Recebido em: 2016.05.12

Aprovado em: 2016.10.28

ISSUE DOI: 10.3738/1982.2278.1673

RESUMO: O balanço hídrico climatológico proposto por Thornthwaite e Mather (1955) é uma ferramenta de extrema utilidade para o planejamento agrícola. Este método requer o conhecimento da capacidade de água disponível no solo (CAD), precipitação e evapotranspiração potencial (ETP) como dados de entrada. As saídas consistem em déficit hídrico (DEF), excedente hídrico (EXC) e evapotranspiração real (ETR). Todavia, os valores assumidos pela CAD alteram significativamente nos valores de DEF, EXC e ETR. O objetivo deste trabalho foi avaliar métodos de interpolação espacial destinadas a criar mapas de EXC, DEF e ETR, obtidos por meio do BHC, considerando seis diferentes valores para a CAD (25, 50, 75, 100, 125 e 300 mm), no Espírito Santo. Os resultados mostram que o método de krigagem ordinária (modelo exponencial) apresentou melhor desempenho para a espacialização dos parâmetros DEF, EXC e ETR em todos os valores de CAD considerados.

Palavras-Chave: Deficit hídrico. Excedente hídrico. Evapotranspiração real. Krigagem

INTERPOLATION OF WATER BALANCE PARAMETERS CONSIDERING DIFFERENT SOIL WATER HOLDING CAPACITY

SUMMARY: The climatological water balance (BHC) proposed by Thornthwaite e Mather (1955) is an useful tool for agricultural planning. This method requires the soil water holding capacity (CAD), rainfall and potential evapotranspiration (ETP) data as input. The outputs consist in water deficit (DEF), water surplus (EXC) and actual evapotranspiration (ETR). However, CAD values strongly influences DEF, EXC and ETR values. The objective of this paper was evaluate spatial interpolation techniques to create maps of DEF, EXC and ETR using six different CAD values (25, 50, 75, 100, 125 and 300 mm) at Espírito Santo State, Brazil. Results show that exponential kriging has better interpolation performance to DEF, EXC and ETR considering all the CAD values. It was also observed that the interpolation performance gets worse when the higher was the CAD value.

Keywords: Water deficit. Water surplus. Actual evapotranspiration. Kiging.

INTRODUÇÃO

Devido à crescente limitação ao acesso à água, tanto em quantidade quanto em qualidade, nas últimas décadas vêm intensificando-se os conflitos relativos à utilização deste recurso natural (SCHEWE et al., 2014). A cada dia, fica mais evidente a redução da disponibilidade hídrica no planeta, ocasionada pelo expressivo aumento da demanda associado à deterioração da qualidade dos mananciais (poluição e assoreamento) e, até mesmo, pela modificação nos padrões climáticos em diversas regiões do planeta (HOEKSTRA et al., 2012; ONDA et al., 2012; RULLI et al., 2013; SCHEWE et al., 2014).

¹ Professor Associado, D.Sc. em Engenharia Agrícola, Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq. Universidade Federal do Espírito Santo

² Universidade Federal do Espírito Santo

O setor agrícola, sendo o maior usuário de água no planeta, tem no conhecimento da distribuição temporal e espacial da disponibilidade hídrica, uma ferramenta de fundamental importância para o adequado planejamento da agricultura, a fim de alcançar a sustentabilidade do desenvolvimento. Uma maneira acessível de obter informações com respeito à disponibilidade de água no solo para os cultivos agrícolas é a partir do cálculo do balanço hídrico climatológico (BHC). O BHC consiste na contabilização das entradas e saídas de água no solo, resultante do princípio de conservação de massa em um volume de solo vegetado, fornecendo informações como evapotranspiração real (ETR), excedente hídrico (EXC), déficit hídrico (DEF) e disponibilidade hídrica (ER/ETP) (BLACK, 2007; PEREIRA, 2005; PEREIRA et al., 2002).

O conhecimento dos parâmetros do BHC norteia a gestão e o planejamento hidroagrícola, a delimitação de zonas agroecológicas e o controle dos recursos hídricos em bacias hidrográficas. Também está relacionado ao conhecimento do regime hídrico de uma região; à realização de estudos de zoneamento climático; à definição de épocas apropriadas para o preparo do solo, para a semeadura/plantio, para a pulverização e para a colheita; e ao cálculo da irrigação, por compor base para definição dos períodos de deficiência hídrica em que há necessidade de irrigação suplementar e a identificação dos períodos de excesso, os quais poderão ser aproveitados para o armazenamento da água da chuva (ALMEIDA et al., 2013; BHERING et al., 2014; SANTOS et al., 2013; sentelhas et al., 2008; SOUZA et al., 2015; VIEIRA et al., 2014).

A capacidade de água disponível (CAD) é uma característica do solo essencial ao cálculo do BHC, variando de acordo com características inerentes ao próprio solo (textura, estrutura, densidade, porosidade, dentre outros) e aquelas relacionadas com a cultura de interesse (profundidade do sistema radicular); sendo que a incorreta definição de seu valor altera os resultados do BHC (SOUZA; GOMES, 2008).

O conhecimento da distribuição espacial dos parâmetros do BHC em uma região com indisponibilidade de tais dados é possível com a utilização de interpoladores espaciais. Alguns estudos têm utilizado diferentes métodos de interpolação espacial para estimativas geograficamente distribuídas dos elementos do BHC (KLIPPEL et al., 2013; SILVA et al., 2014; ZARO et al., 2014). Todavia, não há evidências de um único método de interpolação que seja o mais indicado para qualquer região ou qualquer elemento do BHC, principalmente da deficiência e do excedente hídrico (CASTRO et al., 2010a).

Do exposto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de dois diferentes interpoladores (“Inverso de uma Potência da Distância” e “Krigagem ordinária”) aplicados na espacialização de quatro parâmetros do BHC (evapotranspiração real, deficiência hídrica, excedente hídrico e disponibilidade hídrica), calculado considerando seis diferentes valores de CAD (25 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm, 125 mm e 300 mm), para o estado do Espírito Santo.

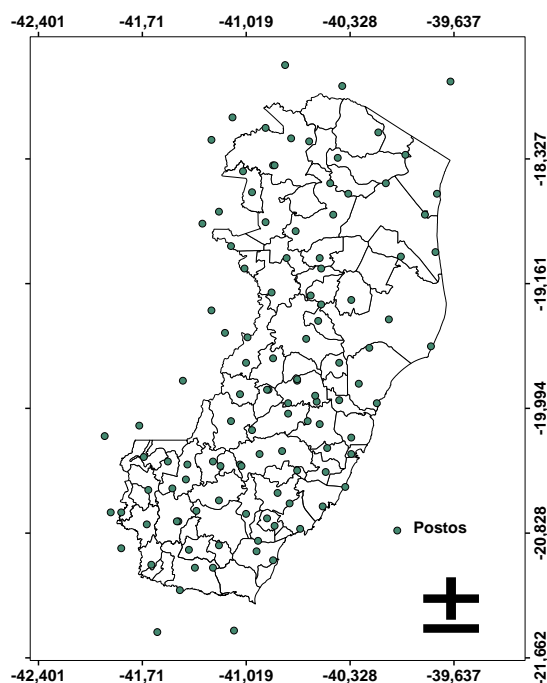
MATERIAL E MÉTODO

O presente estudo contempla o Estado do Espírito Santo, localizado entre os meridianos $-39^{\circ}38'$ e $-41^{\circ}50'$ e entre os paralelos $-17^{\circ}52'$ e $-21^{\circ}19'$, apresentando área igual a $46.184,1 \text{ Km}^2$, fazendo divisa com os estados de Minas Gerais, Bahia e Rio de Janeiro.

Utilizaram-se dados climáticos medidos em 110 diferentes postos meteorológicos ou pluviométricos (Figura 1), sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), localizados no Espírito Santo e estados adjacentes. Tais dados continham séries históricas de temperaturas médias do ar e de precipitação pluvial, em escala mensal e considerando um período de 30 anos de dados (1977-2006). Nos postos em que havia indisponibilidade de valores das temperaturas

médias mensais do ar, estas foram estimadas com base em suas coordenadas geográficas e altitude, utilizando-se as equações propostas para os Estados do Espírito Santo (CASTRO et al., 2010b), da Bahia (ASSAD et al., 2001), de Minas Gerais (SEDIYAMA; MELO JÚNIOR, 1998) e do Rio de Janeiro (ALFONSI et al., 2002).

Figura 1. Localização dos postos pluviométricos utilizados no trabalho.



Fonte: Elaborado pelos autores

Calcularam-se, para cada um dos 110 postos, os balanços hídricos climáticos mensais, conforme preconizados por Thornthwaite e Mather – 1955, descrito em Pereira et al. (2002). Em virtude de haver apenas disponibilidade de dados de temperatura média do ar e precipitação, a evapotranspiração potencial foi estimada a partir do método proposto por Thornthwaite (THORNTHWAITE, 1948), pois este apresentou somente pequenos desvios de estimativa quando comparado com o Método da FAO Penman-Monteith, para o Estado do Espírito Santo, conforme trabalho de Sentelhas et al. (2008).

Adotaram-se, ainda, seis diferentes valores de CAD para os cálculos do BHC, a saber: 25, 50, 75, 100, 125 e 300 mm. Desta forma, foram realizados seis balanços hídricos climáticos para cada posto, totalizando 660 BHCs, obtendo-se os valores de evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF), excedente hídrico (EXC) e disponibilidade hídrica (ER/ETP).

Os valores de ETR, DEF, EXC e ER/ETP foram associados a cada um dos postos utilizados no estudo. Estes dados passaram por uma análise descritiva para verificar alguma anormalidade, sendo logo em seguida realizada análise geoestatística para quantificar o grau de dependência espacial dos dados através de semivariograma experimental, estimado 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:

$\gamma^*(h)$ = valor do semivariograma estimado para a distância h ;

$N(h)$ = número de pares de valores medidos;

x_i e $x_i + h$ = locais de amostragens separados por uma distância h ; e

$Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$ = valores medidos das variáveis nos locais correspondentes.

A análise espacial da dependência dos dados foi realizada por intermédio de rotina computacional, que utiliza os valores da variável em estudo com suas respectivas coordenadas de campo para a construção do semivariograma experimental (XAVIER et al., 2010). Desta forma, para a realização de interpolação pela técnica de espacialização “Krigagem ordinária”, realizou-se ajuste automático dos modelos teóricos - exponencial, esférico, gaussiano e linear com patamar ao semivariograma experimental, de modo que a curva que melhor se ajustar aos pontos obtidos represente a magnitude, alcance e intensidade da variabilidade espacial da variável estudada.

Para fins de comparação entre técnicas de interpolação, avaliou-se o desempenho da Krigagem aplicada com semivariograma estimado pelos modelos exponencial (K-EXP), esférico (K-ESF), gaussiano (K-GAU) e linear (K-LIN) com a metodologia de interpolação “Inverso de uma potência da distância”, aplicando-se as potências 1 (IPD1), 2 (IPD2), 3 (IPD3), 4 (IPD4) e 5 (IPD5).

A construção do semivariograma experimental foi efetuada para um elemento de cada vez, sendo que ao final se obteve um conjunto de resultados, provenientes da análise como, por exemplo, os valores de “ C_0 ”, “ a ” e “ $C+C_0$ ” para o efeito pepita, alcance e patamar respectivamente.

A análise dos métodos de interpolação foi feita com a utilização do consagrado método de validação cruzada (AMORIM et al., 2008; ROBINSON;METTERNICHT, 2006; XAVIER et al., 2010). De acordo com esta metodologia, a partir da base de dados contendo localização de todos os postos e seus respectivos valores dos resultados do BHC, procedeu-se à extração de uma dos 110 postos, realizando-se, posteriormente a interpolação de cada um dos parâmetros resultantes do BHC, em cada uma das CADs, através dos métodos de interpolação avaliados. Após a realização da interpolação, o posto extraído foi recolocado na base de dados e outro posto foi extraído, até que tal procedimento fosse feito com todos os postos. Desta forma, para cada um dos 110 postos, foi possível comparar os valores observados (O) e estimados pelos interpoladores (E) para cada um dos parâmetros do BHC.

A avaliação do desempenho dos interpoladores foi feita com base nos seguintes critérios estatísticos: erro quadrático médio (EQM), índice de confiança (c) (CAMARGO;SENTELHAS, 1997), coeficiente de eficiência ajustado (E') (LEGATES;MCCABE JR., 1999) e erro médio percentual (EMP), representados pelas equações 2 a 5.

$$EQM = \frac{\sum_{i=1}^J (O_i - E_i)^2}{J} \quad (2)$$

em que:

EQM = erro quadrático médio;

J = número de observações da variável;

O = valor observado da variável; e

E = valor da variável estimado pelo interpolador.

$$c = r \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^J (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^J \left(\left| E_i - \bar{O} \right| + \left| O_i - \bar{O} \right| \right)^2} \right) \quad (3)$$

em que:

c = índice de confiança, analisado segundo critérios da Tabela 1;

r = coeficiente de correlação; e

\bar{O} = média dos valores da variável observados experimentalmente.

$$E' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J |O_i - E_i|}{\sum_{i=1}^J |O_i - \bar{O}|} \quad (4)$$

em que E' é o coeficiente de eficiência ajustado, variando entre $-\infty$ a 1, onde os valores mais próximos a 1 caracterizam melhor desempenho.

$$EMP = \frac{\sum_{i=1}^J \frac{|O_i - E_i|}{O_i}}{J} * 100 \quad (5)$$

em que EMP é o erro médio percentual.

O índice de confiança (c) permite analisar conjuntamente a precisão e a exatidão dos resultados obtidos, sendo que o desempenho dos interpoladores é definido conforme Tabela 1.

Tabela 1. Valores para análise do desempenho de interpoladores com base no índice de confiança (CAMARGO;SENTELHAS, 1997)

Índice de confiança (c)	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os índices estatísticos calculados para análise dos interpoladores visando a espacialização da evapotranspiração real anual, no estado do Espírito Santo, de acordo com os diferentes valores de CAD. Observa-se que os índices estatísticos apresentaram uma tendência a apresentar piores resultados ao elevar-se o valor da CAD, denotando a importância do valor deste parâmetro associado ao método de interpolação.

Os modelos do Inverso de uma Potência da Distância (IPD) apresentaram desempenho variando de “sofrível” a “péssimo”, indicativo que estes modelos não obterão resultados satisfatórios na execução da interpolação. Dentre os todos os modelos de krigagem avaliados, o gaussiano apontou pior desempenho, variando de mediano a péssimo, segundo a avaliação apresentada na Tabela 1. O modelo que apresentou melhor desempenho para interpolação da ETR, considerando os seis diferentes valores para a CAD, foi a

krigagem exponencial (K-EXP), baseado no menor REMQ e EMP nos maiores valores de c e E' , e apresentando EMP sempre menor ou igual a 8%. Os parâmetros do semivariograma para K-EXP são apresentados na Tabela 3.

Tabela 2. Índices estatísticos para análise do desempenho dos interpoladores para estimativa da evapotranspiração real anual no Espírito Santo

CAD (mm)	Índice estatístico	Método de interpolação									
		K-EXP [#]	K-ESF	K-GAU	K-LIN	IPD 1	IPD 2	IPD 3	IPD 4	IPD 5	IPD 6
25	REMQ	74,3	78,0	101,7	82,4	96,6	96,7	98,7	101,5	104,3	106,6
	c	0,74	0,72	0,64	0,70	0,56	0,56	0,55	0,54	0,53	0,52
	Desempenho	Bom	Bom	Mediano	Bom	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível
	E'	0,45	0,44	0,33	0,43	0,32	0,33	0,32	0,30	0,29	0,28
	EMP (%)	6	6	7	6	7	7	7	7	8	8
50	REMQ	76,8	81,1	104,7	85,3	98,7	98,9	101,0	104,0	106,8	109,2
	c	0,73	0,70	0,62	0,68	0,54	0,55	0,54	0,52	0,51	0,50
	Desempenho	Bom	Bom	Mediano	Bom	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Mau
	E'	0,44	0,43	0,32	0,42	0,31	0,32	0,31	0,30	0,28	0,27
	EMP (%)	6	6	7	6	7	7	7	7	8	8
75	REMQ	80,7	85,4	109,4	90,0	102,1	102,4	104,6	107,7	110,8	113,3
	c	0,70	0,67	0,59	0,65	0,51	0,52	0,51	0,50	0,48	0,47
	Desempenho	Bom	Bom	Sufrível	Mediano	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Mau	Mau	Mau
	E'	0,42	0,41	0,30	0,40	0,30	0,31	0,30	0,28	0,26	0,25
	EMP (%)	6	6	7	6	8	7	7	8	8	8
100	REMQ	85,6	89,7	115,3	94,4	105,6	106,0	108,4	111,7	114,8	117,5
	c	0,67	0,64	0,56	0,62	0,49	0,49	0,48	0,47	0,45	0,44
	Desempenho	Bom	Mediano	Sufrível	Mediano	Mau	Mau	Mau	Mau	Mau	Mau
	E'	0,39	0,38	0,27	0,37	0,28	0,29	0,28	0,25	0,24	0,22
	EMP (%)	6	7	7	7	8	8	8	8	8	8
125	REMQ	92,3	94,2	121,4	98,6	109,0	109,5	112,1	115,6	118,9	121,6
	c	0,62	0,62	0,52	0,59	0,46	0,46	0,45	0,44	0,43	0,42
	Desempenho	Mediano	Mediano	Sufrível	Sufrível	Mau	Mau	Mau	Mau	Mau	Mau
	E'	0,35	0,35	0,25	0,34	0,26	0,26	0,25	0,23	0,21	0,19
	EMP (%)	7	7	8	7	8	8	8	8	8	9
300	REMQ	106,0	109,5	*	112,7	123,3	124,3	127,6	131,8	135,5	138,6
	c	0,55	0,53	*	0,52	0,37	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34
	Desempenho	Sufrível	Sufrível	*	Sufrível	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Péssimo
	E'	0,28	0,27	*	0,28	0,19	0,19	0,18	0,15	0,12	0,10
	EMP (%)	8	8	*	8	9	9	9	10	10	10

REMQ - raiz do erro médio quadrático; c - índice de confiança; E' - coeficiente de eficiência ajustado; EMP (%) - erro médio percentual

* não houve ajuste

Tabela 3. Parâmetros do semivariograma do interpolador de melhor desempenho (K-EXP) para a variável evapotranspiração real média anual no Espírito Santo, tomando-se diferentes valores de capacidade de água disponível (CAD)

CAD (mm)	Efeito pepita (C_0)	Patamar (C_0+C_1)	Alcance (a)
25	2094,385648	19867,01	47,76871
50	2386,746087	19692,03	47,80637
75	3854,989376	18434,2	49,13423
100	8866,529993	6921,672	45,42862
125	8443,217283	8672,373	62,27834
300	11820,20467	7595,686	43,39425

Na Tabela 4 são apresentados os índices estatísticos calculados para análise dos interpoladores visando a espacialização da deficiência hídrica anual no estado do Espírito Santo, de acordo com os diferentes valores de CAD.

Os métodos do IPD apresentaram comportamento “sofrível” para a interpolação em todas as CAD, exceto na CAD 300, em que foram classificados como de desempenho “mau”. À exceção do modelo gaussiano, os modelos utilizados nas interpolações por krigagem apresentaram comportamento semelhante, apresentando desempenhos de interpolação superiores aos modelos IPD em todos os valores de CAD. Todavia, o modelo exponencial (parâmetros do semivariograma na Tabela 5) sobressaiu-se aos demais, possuindo melhor desempenho estatístico para a interpolação da deficiência hídrica no Espírito Santo. De modo semelhante à ETR, observa-se tendência de queda no desempenho estatístico de interpolação com o aumento da CAD.

Da mesma forma que evidenciado em outros trabalhos (CASTRO et al., 2010a; CECÍLIO et al., 2012), o parâmetro DEF apresenta altos valores de EMP (Tabela 4) devido ao grande número de valores reais muito próximos a zero e que levam a altíssimos erros percentuais quando calculados pela equação 5. O zero é um limite físico não atendido pelo critério matemático da interpolação. Na interpolação ocorrem estimativas inferiores a zero, que não existem fisicamente. A mesma consideração é válida para o parâmetro EXC, apresentado na sequência (Tabela 6). Os problemas associados à interpolação do DEF e do EXC, em especial aos valores negativos, podem ser minimizados realizando-se o balanço hídrico pixel a pixel em um mapa, e não interpolando os resultados pontuais das estações, conforme mostrado por CECÍLIO et al. (2012).

Tabela 4. Índices estatísticos para análise do desempenho dos interpoladores para estimativa da deficiência hídrica anual no Espírito Santo **(Continua)**

CAD (mm)	Índice estatístico	Método de interpolação									
		K-EXP [#]	K-ESF	K-GAU	K-LIN	IPD 1	IPD 2	IPD 3	IPD 4	IPD 5	IPD 6
25	REM _Q	86,8	87,9	129,5	87,9	95,1	94,7	96,5	99,5	102,6	105,4
	<i>c</i>	0,67	0,67	0,46	0,67	0,59	0,60	0,60	0,58	0,57	0,56
	Desempenho	Bom	Bom	Mau	Bom	Sufrível	Mediano	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível
	<i>E'</i>	0,44	0,43	0,28	0,43	0,34	0,35	0,35	0,34	0,32	0,30
	EMP (%)	613	604	581	604	800	809	832	868	915	965

Tabela 4. Índices estatísticos para análise do desempenho dos interpoladores para estimativa da deficiência hídrica anual no Espírito Santo (Conclusão)

CAD (mm)	Índice estatístico	Método de interpolação									
		K-EXP [#]	K-ESF	K-GAU	K-LIN	IPD 1	IPD 2	IPD 3	IPD 4	IPD 5	IPD 6
	REM _Q	84,4	86,1	126,6	86,1	93,4	93,1	95,0	98,0	101,0	103,7
	c	0,67	0,66	0,45	0,67	0,59	0,60	0,59	0,58	0,56	0,55
	Desempenho	Bom	Bom	Mau	Bom	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível
	E'	0,44	0,43	0,28	0,43	0,34	0,35	0,35	0,34	0,32	0,30
	EMP (%)	983	931	986	930	1290	1306	1347	1410	1490	1578
75	REM _Q	83,2	85,2	123,2	85,3	92,7	92,5	94,4	97,4	100,4	103,1
	c	0,66	0,65	0,44	0,65	0,57	0,58	0,57	0,56	0,55	0,53
	Desempenho	Bom	Bom	Mau	Bom	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível
	E'	0,43	0,42	0,27	0,42	0,33	0,35	0,35	0,33	0,32	0,30
	EMP (%)	1215	1151	1270	1150	1648	1666	1715	1796	1899	2011
100	REM _Q	83,5	85,8	121,6	85,5	93,3	93,0	94,8	97,7	100,7	103,2
	c	0,66	0,64	0,43	0,64	0,55	0,56	0,56	0,54	0,53	0,52
	Desempenho	Bom	Mediano	Mau	Mediano	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível
	E'	0,43	0,42	0,25	0,41	0,32	0,34	0,34	0,33	0,31	0,29
	EMP (%)	1323	1344	1478	1321	1921	1936	1988	2078	2196	2326
125	REM _Q	84,5	86,4	121,5	86,5	94,5	94,1	95,9	98,8	101,6	104,2
	c	0,64	0,63	0,42	0,63	0,54	0,55	0,54	0,53	0,52	0,50
	Desempenho	Mediano	Mediano	Mau	Mediano	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível
	E'	0,42	0,41	0,25	0,40	0,31	0,33	0,34	0,32	0,31	0,29
	EMP (%)	1441	1458	1632	1455	2139	2148	2199	2294	2421	2562
300	REM _Q	93,0	93,7	126,0	93,6	104,2	104,7	107,2	110,5	113,6	116,2
	c	0,59	0,59	0,40	0,59	0,46	0,47	0,46	0,44	0,43	0,42
	Desempenho	Sufrível	Sufrível	Péssimo	Sufrível	Mau	Mau	Mau	Mau	Mau	Mau
	E'	0,38	0,38	0,25	0,38	0,29	0,31	0,31	0,30	0,29	0,28
	EMP (%)	2327	2361	2867	2360	3824	3754	3762	3860	4027	4231

REM_Q - raiz do erro médio quadrático; c - índice de confiança; E' - coeficiente de eficiência ajustado; EMP (%) - erro médio percentual
[#] melhor interpolador

Tabela 5. Parâmetros do semivariograma do interpolador de melhor desempenho (K-EXP) para a variável deficiência hídrica média anual no Espírito Santo, tomando-se diferentes valores de capacidade de água disponível (CAD)

CAD (mm)	Efeito pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ +C ₁)	Alcance (a)
25	724,4865831	23666,47119	53,86112023
50	0	20881,87666	43,31256787
75	139,102983	20087,3835	43,48638843
100	6219,183811	7372,310663	60,77689207
125	6436,789885	8104,699222	62,34618881
300	7097,441363	9340,216098	117,3317119

Na Tabela 6 são apresentados os índices estatísticos calculados para análise dos interpoladores visando a espacialização do excedente hídrico médio anual no estado do Espírito Santo, de acordo com os Nucleus, v.13, n.2, out.2016

diferentes valores de CAD. Observa-se, conforme evidenciado para os outros parâmetros, forte tendência de redução do desempenho conforme se aumenta os valores associados à CAD.

Com relação ao parâmetro EXC, não houve um interpolador que fosse o de melhor desempenho para todos os valores de CAD, sendo que a krigagem linear foi melhor para os valores de CAD mais baixas (25 mm e 50 mm) e a krigagem exponencial foi melhor para os valores de CAD intermediários (75 mm, 100 mm e 125 mm). Para o maior valor de CAD, o melhor desempenho foi da krigagem exponencial (parâmetros do semivariograma na Tabela 7) em alguns dos índices estatísticos e o IPD1 em outros. Todavia, o desempenho da krigagem foi sempre próximo ao interpolador de melhor desempenho, fazendo com que este seja o método recomendado para a interpolação do EXC no Espírito Santo.

Tabela 6. Índices estatísticos para análise do desempenho dos interpoladores para estimativa do excedente hídrico anual no Espírito Santo

CAD (mm)	Índice estatístico	Método de interpolação									
		K-EXP [#]	K-ESF	K-GAU	K-LIN	IPD 1	IPD 2	IPD 3	IPD 4	IPD 5	IPD 6
25	REM _Q	116,6	116,6	148,0	116,6	121,5	121,2	123,4	126,7	130,0	133,0
	c	0,63	0,63	0,50	0,63	0,58	0,59	0,58	0,57	0,56	0,54
	Desempenho	Mediano	Mediano	Mau	Mediano	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível
	E'	0,39	0,39	0,22	0,39	0,33	0,33	0,31	0,29	0,28	0,27
	EMP (%)	1490	1530	2442	1490	2525	2395	2282	2195	2136	2102
50	REM _Q	119,6	119,6	148,7	119,6	124,2	123,8	126,0	129,5	132,9	136,1
	c	0,62	0,62	0,52	0,62	0,58	0,59	0,58	0,57	0,55	0,54
	Desempenho	Mediano	Mediano	Sofrível	Mediano	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível
	E'	0,40	0,40	0,25	0,40	0,33	0,33	0,32	0,30	0,29	0,28
	EMP (%)	3398	3452	4586	3397	8214	7767	7389	7091	6861	6689
75	REM _Q	123,2	123,2	152,7	123,2	126,8	126,4	128,8	132,4	136,1	139,4
	c	0,62	0,62	0,52	0,62	0,58	0,59	0,58	0,57	0,55	0,54
	Desempenho	Mediano	Mediano	Sofrível	Mediano	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível
	E'	0,41	0,41	0,26	0,41	0,34	0,34	0,33	0,31	0,30	0,29
	EMP (%)	4758,3	4743	5397	4763	13590	12721	11926	11298	10825	10470
100	REM _Q	125,9	126,5	156,7	126,5	128,9	128,6	131,2	135,0	138,9	142,4
	c	0,61	0,61	0,51	0,61	0,58	0,59	0,58	0,57	0,55	0,54
	Desempenho	Mediano	Mediano	Sofrível	Mediano	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível
	E'	0,42	0,41	0,26	0,41	0,34	0,35	0,33	0,32	0,31	0,30
	EMP (%)	8691	8041	10710	8050	18775	17311	16090	15193	14552	14088
125	REM _Q	128,7	129,5	163,2	129,4	130,8	130,7	133,4	137,4	141,5	145,1
	c	0,60	0,60	0,49	0,60	0,58	0,58	0,58	0,56	0,55	0,53
	Desempenho	Mediano	Mediano	Mau	Mediano	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível
	E'	0,42	0,42	0,25	0,42	0,35	0,35	0,34	0,33	0,31	0,31
	EMP (%)	9545	9242	14663	9277	18752	17090	15739	14780	14123	13670
300	REM _Q	138,0	139,0	178,6	139,0	136,9	137,0	140,0	144,3	148,7	152,6
	c	0,57	0,57	0,46	0,57	0,56	0,57	0,56	0,55	0,53	0,52
	Desempenho	Sofrível	Sofrível	Mau	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível
	E'	0,44	0,43	0,28	0,43	0,38	0,39	0,38	0,37	0,36	0,36
	EMP (%)	19757	20499	32760	20562	30093	28937	28018	27348	26842	26440

REM_Q - raiz do erro médio quadrático; c - índice de confiança; E' - coeficiente de eficiência ajustado; EMP (%) - erro médio percentual
[#] melhor interpolador

Tabela 7. Parâmetros do semivariograma do interpolador de melhor desempenho (K-EXP) para a variável excedente hídrico médio anual no Espírito Santo, tomando-se diferentes valores de capacidade de água disponível (CAD)

CAD (mm)	Efeito pepita (C_0)	Patamar (C_0+C_1)	Alcance (a)
25	14559,55269	17996,09569	128884,9414
50	12465,80541	21344,61621	28720,13928
75	15521,07094	15195,14907	6072,143447
100	14583,57163	20996,87226	65,7069701
125	15792,79638	20007,73183	63,73589971
300	17798,85106	20457,39495	66,43513754

Na Tabela 8 são apresentados os índices estatísticos calculados para análise dos interpoladores visando a espacialização da disponibilidade hídrica média anual no estado do Espírito Santo, de acordo com os diferentes valores de CAD. Os índices de erros EQM, EMA e EMP apresentam-se relativamente baixos, devido a disponibilidade hídrica variar entre 0 e 1.

Os índices estatísticos assinalam uma superioridade do método de krigagem exponencial (parâmetros do semivariograma na Tabela 9) para a interpolação deste parâmetro para todos os níveis de CAD, corroborando outros trabalhos (MACEDO et al., 2001; Ribeiro et al., 2011), que apontaram para a importância da krigagem na interpolação da disponibilidade hídrica.

Tabela 8. Índices estatísticos para análise do desempenho dos interpoladores para estimativa da disponibilidade hídrica média anual no estado do Espírito Santo (Continua)

CAD (mm)	Índice estatístico	Método de interpolação									
		K-EXP [#]	K-ESF	K-GAU	K-LIN	IPD 1	IPD 2	IPD 3	IPD 4	IPD 5	IPD 6
25	REM-Q	0,06	0,06	0,08	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	c	0,70	0,69	0,53	0,69	0,62	0,63	0,63	0,61	0,60	0,59
	Desempenho	Bom	Bom	Sufrível	Bom	Mediano	Mediano	Mediano	Mediano	Sufrível	Sufrível
	E'	0,44	0,43	0,30	0,44	0,37	0,38	0,37	0,36	0,34	0,32
	EMP (%)	5,66	5,78	7,12	5,77	6,55	6,47	6,51	6,66	6,85	7,00
50	REM-Q	0,06	0,06	0,08	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	c	0,69	0,69	0,52	0,69	0,62	0,63	0,62	0,60	0,59	0,58
	Desempenho	Bom	Bom	Sufrível	Bom	Mediano	Mediano	Mediano	Mediano	Sufrível	Sufrível
	E'	0,44	0,43	0,30	0,43	0,36	0,37	0,37	0,36	0,34	0,32
	EMP (%)	5,47	5,63	6,90	5,62	6,37	6,28	6,32	6,45	6,64	6,79
75	REM-Q	0,06	0,06	0,08	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	c	0,68	0,67	0,50	0,68	0,60	0,61	0,60	0,59	0,57	0,56
	Desempenho	Bom	Bom	Sufrível	Bom	Mediano	Mediano	Sufrível	Sufrível	Sufrível	Sufrível
	E'	0,43	0,42	0,28	0,42	0,35	0,37	0,37	0,35	0,33	0,32
	EMP (%)	5,39	5,54	6,82	5,55	6,26	6,13	6,16	6,31	6,48	6,63

Tabela 8. Índices estatísticos para análise do desempenho dos interpoladores para estimativa da disponibilidade hídrica média anual no estado do Espírito Santo **(Conclusão)**

CAD (mm)	Índice estatístico	Método de interpolação									
		K-EXP [#]	K-ESF	K-GAU	K-LIN	IPD 1	IPD 2	IPD 3	IPD 4	IPD 5	IPD 6
100	REMQ	0,06	0,06	0,08	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	c	0,67	0,66	0,49	0,66	0,58	0,59	0,58	0,57	0,55	0,54
	Desempenho	Bom	Bom	Mau	Bom	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível
	E'	0,42	0,41	0,27	0,41	0,34	0,36	0,36	0,34	0,32	0,31
	EMP (%)	5,37	5,53	6,70	5,54	6,22	6,09	6,11	6,25	6,41	6,58
125	REMQ	0,06	0,06	0,08	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	c	0,65	0,65	0,47	0,65	0,56	0,57	0,56	0,55	0,54	0,53
	Desempenho	Bom	Mediano	Mau	Bom	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível	Sofrível
	E'	0,40	0,40	0,27	0,40	0,33	0,35	0,35	0,33	0,31	0,29
	EMP (%)	5,52	5,53	6,65	5,54	6,24	6,12	6,12	6,24	6,42	6,60
300	REMQ	0,06	0,07	0,09	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08
	c	0,61	0,60	0,41	0,60	0,48	0,48	0,47	0,46	0,45	0,44
	Desempenho	Mediano	Mediano	Mau	Mediano	Mau	Mau	Mau	Mau	Mau	Mau
	E'	0,39	0,39	0,25	0,39	0,30	0,32	0,32	0,31	0,30	0,29
	EMP (%)	5,94	5,92	6,99	5,92	6,79	6,66	6,61	6,71	6,85	6,99

REMQ - raiz do erro médio quadrático; c - índice de confiança; E' - coeficiente de eficiência ajustado; EMP (%) - erro médio percentual
melhor interpolador

Tabela 9. Parâmetros do semivariograma do interpolador de melhor desempenho (K-EXP) para a variável disponibilidade hídrica média anual no Espírito Santo, tomando-se diferentes valores de capacidade de água disponível (CAD)

CAD (mm)	Efeito pepita (C_0)	Patamar (C_0+C_1)	Alcance (a)
25	0,0000524796	0,0106171	43,27608922
50	0	0,010468942	43,27608942
75	0	0,010171746	43,27608946
100	0	0,0100071	43,27608946
125	0,002017817	0,008377551	65,70343997
300*	0,002512237	0,00824962	66,78499115

* IPD1 apresentou melhor desempenho

Os resultados obtidos vêm constatar a superioridade do interpolador krigagem ordinária exponencial para estimativa dos parâmetros do balanço hídrico no Espírito Santo, corroborando outros estudos (CASTRO et al., 2010a; CECÍLIO et al., 2012; RIBEIRO et al., 2011) na mesma área. A krigagem é indicada para interpolação em regiões com heterogênea distribuição espacial dos postos de observação, nas quais não há descontinuidades significativas. O IPD, por sua vez, é de melhor aplicação em regiões com boa distribuição espacial associada a uma elevada densidade de estações de observação (AKKALA et al., 2010), o que não é o caso da presente área em estudos. Ademais, a krigagem baseando-se na

não-tendenciosidade do estimador e variância mínima das estimativas (Vieira, 2000), determina, a partir dos dados observados, os melhores parâmetros para modelagem da função matemática de interpolação, por meio do ajuste do semivariograma, resultando em melhores estimativas (Falivene et al., 2010; Sivapragasam et al., 2010). Desta forma, corroborando outros estudos (Assad et al., 2003; Carvalho & Assad, 2005; Viola et al., 2010), os valores interpolados por meio da krigagem são não-viciados, têm variância mínima e são ideais para a construção de mapas de isolinhas ou tridimensionais para a verificação e a interpretação da variabilidade espacial de elementos climáticos; sendo, desta forma, muito úteis para entender a variabilidade das características climáticas de uma região e identificar áreas com maior ou menor favorabilidade de desenvolvimento de culturas e ocorrência de patógenos.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem concluir que:

1. O método krigagem ordinária apresenta desempenho superior ao método IPD na espacialização dos parâmetros evapotranspiração real (ETR), déficit hídrico (DEF), excedente hídrico (EXC) e disponibilidade hídrica (ER/ETP), no estado do Espírito Santo, para todos os valores de CAD avaliados.
2. O método de krigagem exponencial mostrou-se como o melhor dos interpoladores para todos os parâmetros avaliados, nos valores de CAD considerados no presente estudo.

REFERÊNCIAS

AKKALA, A.; DEVABHAKTUNI, V.; KUMAR, A. Interpolation Techniques and Associated Software for Environmental Data. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 29, n. 2, p. 134–141, 2010. DOI: 10.1002/ep.

ALFONSI, R. R. et al. **Zoneamento climático da cultura do café (Coffea arabica) no estado do Rio de Janeiro**. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/cafe/index.shtml-relat_RJ.html>.

ALMEIDA, T. S.; CALIJURI, M. L.; PINTO, L. B. Zoneamento agro-climático da cana-de-açúcar para o estado de Minas Gerais com base em regressões múltiplas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 352–355, 2013. DOI: 10.1590/S0102-77862013000300011.

AMORIM, R. C. F. DE et al. Avaliação do desempenho de dois métodos de espacialização da precipitação pluvial para o Estado de Alagoas. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 30, n. 1, p. 87–91, 2008.

ASSAD, E. D. et al. Zoneamento agroclimático para a cultura de café (Coffea arabica L.) no estado de Goiás e sudoeste do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 510–518, 2001.

ASSAD, E. D. et al. Avaliação de métodos geostatísticos na espacialização de índices agrometeorológicos para definir riscos climáticos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 2, p. 161–171, 2003.

BHERING, S. B. et al. Geotecnologias aplicadas ao Zoneamento Agroecológico do estado do Mato Grosso do Sul. **Sociedade & Natureza**, v. 26, n. 1, p. 171–187, 2014. DOI: 10.1590/1982-451320140112.

BLACK, P. E. Revisiting the Thornthwaite and Mather Water Balance. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 43, n. 6, p. 1604–1605, 2007. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2007.00132.x.

- CAMARGO, Â. P. DE; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.
- CARVALHO, J. R. P. DE; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 377–384, 2005.
- CASTRO, F. DA S.et al. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 8, p. 871–880, 2010a. DOI: 10.1590/S1415-43662010000800012.
- CASTRO, F. DA S.et al. Uso de imagens de radar na espacialização da temperatura do ar. **Idesia (Arica)**, v. 28, n. 3, p. 69–79, 2010b. DOI: 10.4067/S0718-34292010000300009.
- CECÍLIO, R. A.et al. Método para a espacialização dos elementos do balanço hídrico climatológico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 4, p. 478–488, 2012. DOI: 10.1590/S0100-204X2012000400002.
- FALIVENE, O.et al. Interpolation algorithm ranking using cross-validation and the role of smoothing effect. A coal zone example. **Computers & Geosciences**, v. 36, n. 4, p. 512–519, 2010. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.09.015.
- HOEKSTRA, A. Y.et al. Global Monthly Water Scarcity: Blue Water Footprints versus Blue Water Availability. **PLoS ONE**, v. 7, n. 2, p. e32688, 2012. DOI: 10.1371/journal.pone.0032688.
- KLIPPEL, V. H.et al. ZONEAMENTO CLIMÁTICO PARA TECA, CEDRO AUSTRALIANO, NIM INDIANO E PUPUNHA NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Floresta**, v. 43, n. 4, p. 671, 2013. DOI: 10.5380/ufv.43i4.30914.
- LEGATES, D. R.; MCCABE JR., G. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 233–241, 1999. DOI: 10.1029/1998WR900018.
- MACEDO, M. A. DE et al. Avaliação de métodos para espacialização de índices de necessidade hídrica das culturas e sua aplicação em zoneamento agrícola. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 581–587, 2001.
- ONDA, K.; LOBUGLIO, J.; BARTRAM, J. Global Access to Safe Water: Accounting for Water Quality and the Resulting Impact on MDG Progress. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 9, n. 12, p. 880–894, 2012. DOI: 10.3390/ijerph9030880.
- PEREIRA, A. R. Simplificado o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, v. 64, n. 2, p. 311–313, 2005. DOI: 10.1590/S0006-87052005000200019.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações**. 1. ed. Guaíba: Ed. Agropecuária, 2002.
- RIBEIRO, C. A. D.et al. Delimitação de microrregiões agroclimáticas e suas relações com o potencial produtivo da cultura do eucalipto. **FLORESTA**, v. 41, n. 4, 2011. DOI: 10.5380/ufv.41i4.25342.
- ROBINSON, T. P.; METTERNICHT, G. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 50, n. 2, p. 97–108, 2006. DOI: 10.1016/j.compag.2005.07.003.
- RULLI, M. C.; SAVIORI, A.; D’ODORICO, P. Global land and water grabbing. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 3, p. 892–897, 2013. DOI: 10.1073/pnas.1213163110.

- SANTOS, G. O.; LIMA, F. B. DE; VANZELA, L. S. Balanço hídrico espacial das culturas inseridas na bacia hidrográfica do ribeirão santa rita, noroeste paulista. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 7, n. 1, p. 03–16, 2013. DOI: 10.7127/rbai.v7n100091.
- SCHEWE, J. et al. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3245–3250, 2014. DOI: 10.1073/pnas.1222460110.
- SEDIYAMA, G. C.; MELO JÚNIOR, J. C. F. DE. Modelos para estimativa das temperaturas normais mensais médias, máximas, mínimas e anual no estado de Minas Gerais. **Engenharia na Agricultura**, v. 6, n. 1, p. 57–61, 1998.
- SENTELHAS, P. C.; SANTOS, D. L. DOS; MACHADO, R. E. Water deficit and water surplus maps for Brazil, based on FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration. **Revista Ambiente & Água**, v. 3, n. 3, p. 28–42, 2008. DOI: 10.4136/1980-993X.
- SILVA, A. O. DA; MOURA, G. B. DE A.; KLAR, A. E. Classificação climática de Thornthwaite e sua aplicabilidade agroclimatológica nos diferentes regimes de precipitação em Pernambuco. **Irriga**, v. 19, n. 1, p. 46, 2014. DOI: 10.15809/irriga.2014v19n1p46.
- SIVAPRAGASAM, C.; ARUN, V. M.; GIRIDHAR, D. A simple approach for improving spatial interpolation of rainfall using ANN. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 109, n. 1-2, p. 1–7, 2010. DOI: 10.1007/s00703-010-0090-z.
- SOUZA, J. L. M. DE; GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, n. 2, p. 153–163, 2008.
- SOUZA, O. M. M. et al. Edapho-climatic zoning for Eucalyptus urograndis in the State of Tocantins, Brazil. **Journal of Bioenergy and Food Science**, v. 2, n. 2, p. 62–71, 2015. DOI: 10.18067/jbfs.v2i2.36.
- THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.
- VIEIRA, N. L. et al. Potencial da utilização do excesso hídrico para irrigação de “tetos ecológicos” em duas zonas bioclimáticas no Estado de Mato Grosso. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 5, p. 1389–1394, 2014.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1–54.
- VIOLA, M. R. et al. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 9, p. 970–978, 2010. DOI: 10.1590/S1415-43662010000900009.
- XAVIER, A. C.; CECÍLIO, R. A.; LIMA, J. S. DE S. Módulos em Matlab para intrpolação espacial pelo método de Krigagem Ordinária e do Inverso da Distância. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 62, n. 1, p. 67–76, 2010.
- ZARO, G. C. et al. Zoneamento agroclimático para a cultura do abacateiro no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, n. 2, p. 363–372, 2014. DOI: 10.1590/0100-2945-286/13.