

## **MODELOS TEÓRICOS TRANSITIVOS APLICADOS NA INTERPOLAÇÃO ESPACIAL DO ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO PADRONIZADA (SPI) PARA EPISÓDIOS DE EL NIÑO FORTE NO ESTADO DO TOCANTINS**

**GIVANILDO DE GOIS<sup>1</sup>; RAFAEL COLL DELGADO<sup>2</sup> E JOSÉ FRANCISCO DE OLIVEIRA-JÚNIOR<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCAF), Seropédica, RJ, givanildogois@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Professor Doutor do Instituto de Florestas, Departamento de Ciências Ambientais, Seropédica, RJ, rafaelcolldelgado32@gmail.com; joliveirajunior@gmail.com

### **1 RESUMO**

Aplicações de modelos espaciais físico-matemáticos em uma escala espacial e temporal possibilitam minimizar as inconsistências observadas em fenômenos meteorológicos. Foi avaliado o desempenho dos modelos esférico, exponencial e gaussiano na interpolação espacial do índice Standardized Precipitation Index (SPI) em episódios de El Niño forte no Tocantins (TO), Brasil. O método utilizado foi a Krigagem Ordinária (KO). Os eventos foram 1982-83, 1990-93 e 1997-98. O Estado do TO foi dividido em duas regiões: ocidental e oriental. Foi aplicada à estatística descritiva baseado em índices existentes na literatura. Os modelos esférico e exponencial são similares quanto à magnitude dos erros estatísticos e com desempenho considerado ótimo para os ciclos iniciais de 1982-83 e 1990-93, a exceção foi o ciclo 1997-98, seguido do modelo gaussiano com desempenho abaixo em comparação aos demais. Ambos os modelos esférico e exponencial identificam espacialmente os eventos de seca em ambas as regiões no TO e, principalmente nos anos iniciais dos ciclos dos El Niños forte. Vale ressaltar a aplicação da metodologia adotada neste estudo para os eventos de La Niña e, assim melhorar o entendimento dos padrões de precipitação e, conseqüentemente avaliação do índice SPI no estado do Tocantins.

**Palavras-chave:** geoestatística, modelos espaciais, chuva, ENOS.

**GOIS, G; DELGADO, R. C.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.  
TRANSITIVE THEORETICAL MODELS APPLIED TO THE SPATIAL  
INTERPOLATION OF THE STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX (SPI) FOR  
EPISODES OF STRONG EL NINO IN THE TOCANTINS STATE**

### **2 ABSTRACT**

Application of physical–mathematical models in a spatial and temporal scale makes it possible to minimize inconsistencies observed in meteorological phenomena. The study evaluated the performance of spherical, exponential and Gaussian models in the spatial interpolation of the Standardized Precipitation Index (SPI) in episodes of the strong El Niño in Tocantins (TO), Brazil. The Ordinary Kriging method was used. The events were as

follows: 1982-83, 1990-93 and 1997-98. The Tocantins state was divided into western and eastern regions. Descriptive statistics was used based on the existing indices in the literature. The spherical and exponential models are similar concerning the magnitude of statistical errors, and their performance was considered optimal for the initial cycles 1982-83 and 1982-83. The cycle 1997-98 was an exception followed by the Gaussian model which had lower performance in relation to the others. Both the spherical and exponential models spatially identify the drought events in both regions in Tocantins, especially in the initial years of the strong El Niños cycles. It is worth pointing out the application of the study methodology for La Niña events, and as a consequence, the improvement in understanding precipitation patterns, therefore the evaluation of the SPI index in the Tocantins state.

**Keywords:** geostatistics, spatial models, precipitation, ENSO.

### 3 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo utilizaram-se várias formas de representar espacialmente fenômenos cujos valores são medidos em pontos numa escala temporal. Aplicações de modelos espaciais físico-matemáticos em uma escala espacial e temporal possibilitam minimizar as inconsistências observadas nestes fenômenos.

Os métodos de interpolação espaciais baseado em geoestatísticas (Krigagem e Co-Krigagem) são os mais utilizados na literatura, mostrando melhor eficácia que os demais métodos de interpolação (VIEIRA et al., 2002). A aplicação destas técnicas permite o mapeamento de variáveis climáticas que podem produzir resultados satisfatórios sobre o seu comportamento para melhor compreensão da sua distribuição no espaço e no tempo (MELLO et al., 2003; SILVA, 2004; DELGADO et al., 2014).

Entre os métodos de interpolação a Krigagem e Inverso do Quadrado da Distância (IQD) são os mais usados em estudos climáticos, de meio ambiente e modelagem numérica (ASSAD et al., 2003; SOUZA et al., 2010; DELGADO et al., 2014). A Krigagem utiliza a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima. O IQD usa o fator de ponderação que é o inverso do quadrado da distância euclidiana entre o ponto conhecido e o estimado, sendo considerado de fácil aplicação, mas com acurácia menor em comparação a Krigagem, pois não considera a estrutura de dependência espacial (GOODCHILD, 1992; MELLO et al., 2003).

Mello et al. (2007) aplicaram a técnica de Krigagem no mapeamento da erosividade dos solos e na distribuição espacial da precipitação pluvial no estado de Minas Gerais. Os resultados encontrados denotam um elevado grau de erosividade, categorizada em três zonas: média a alta, alta e muito alta. Existindo uma relação de independência entre a distribuição da erosividade e das chuvas no estado de MG.

Segundo Fernandes e Heinemann (2011) não existem uma definição clara sobre a seca e aceita na comunidade científica, o que abre discussão para algumas definições, no entanto, existem classificações do fenômeno. De acordo com Gois et al., (2005) baseado na literatura existente classificaram as secas em quatro diferentes tipos (meteorológica, hidrológica, socioeconômica e agrícola). Em décadas, vários trabalhos científicos foram desenvolvidos, todos com objetivo de construir diferentes índices de severidade de seca como, por exemplo, o Rainfall Anomaly Index (RAI); Índice de Severidade de Seca de Palmer (ISSP) e o Índice

de Anomalia de Umidade (Z-Índice); Método dos Decis (MD); NOAA Drought Index (NDI) e o Standardized Precipitation Index (SPI).

Na avaliação da intensidade, duração e severidade da seca, os vários índices citados anteriormente são baseados em diferentes metodologias, que por sua vez podem apresentar melhores resultados em uma determinada região em comparação as outras regiões existentes no mundo. Neste contexto as ferramentas de geoestatística são boas alternativas nesta avaliação e tem sido aplicada em diversos trabalhos científicos, principalmente método de Krigagem Ordinária - KO (VIOLA et al., 2010; XAVIER et al., 2011). Entretanto, poucos são os trabalhos que utilizam de forma conjunta aplicação dos modelos matemáticos teóricos transitivos (esférico, exponencial e gaussiano), seguidos da estatística descritiva para validação espacial dos índices de seca em uma região.

A seca afeta milhões de pessoas em todo mundo, em particular os habitantes das zonas rurais. No Brasil, principalmente na região do Nordeste Brasileiro (NEB), devido à sua complexidade e à dimensão espacial, a severidade da seca tornou-se um problema secular e governamental. No entanto, esse problema não se restringe simplesmente ao NEB, outros estados também sofrem com a seca, por exemplo, o estado do Tocantins (TO) que apresenta uma carência de informações que possam definir e quantificar as suas ocorrências, quanto a sua intensidade, duração e severidade e suas interações com o modo de variabilidade El Niño-Oscilação Sul (ENOS) (GOIS et al., 2013).

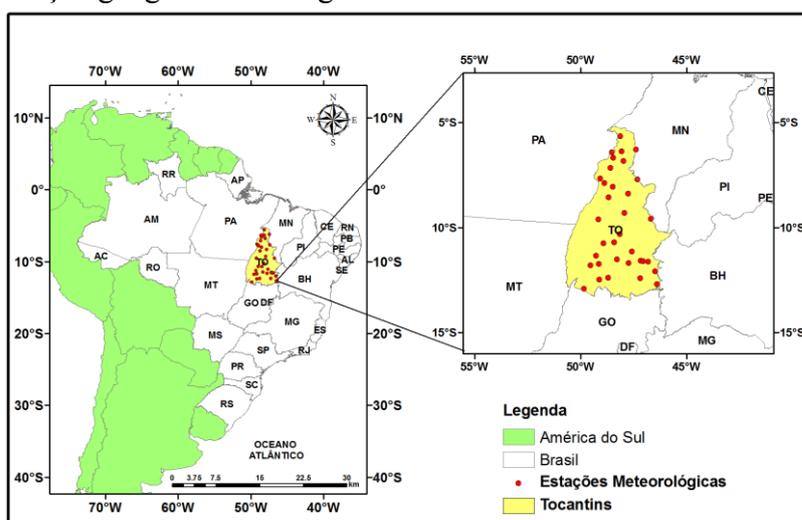
No estado do TO poucos trabalhos climatológicos e sensoriamento remoto foram realizados como, por exemplo, Marcuzzo et al. (2012, 2014) e Marcuzzo e Goularte (2013). No entanto, não foi avaliado o desempenho de modelos de interpolação matemática, seguido dos modelos teóricos transitivos.

Esse trabalho tem dois objetivos principais: i) avaliar o desempenho dos modelos matemáticos teóricos (esférico, exponencial e gaussiano) por meio do método de interpolação da Krigagem Ordinária e ii) determinar qual (is) modelo (s) pode (m) ser usado (s) na avaliação do índice SPI em episódios de El Niño forte, nas regiões ocidental e oriental do estado do Tocantins baseado em estatísticas descritivas aplicadas no período de 1976-2012.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

O estado do TO, localizado na região Norte do país possui uma área de 277.720,520 km<sup>2</sup> (IBGE, 2015). Segundo a classificação climática de Köppen a característica climática da região é "Aw", sendo a estação de inverno (seco e frio) e a estação de verão e outono (chuvosa e úmida) com precipitação média anual de 1.200 mm e média máxima de 1.700 mm (GOIS et al., 2013). Para fins de análise e comparação dos resultados na escala espacial, foi considerada a divisão geográfica do Tocantins em duas regiões: ocidental e oriental (Figura 1).

**Figura 1.** Localização geográfica das regiões ocidental e oriental do estado do Tocantins.

#### 4.2 Índice de Precipitação Padronizada – SPI

O índice SPI foi calculado na escala trimestral dentro dos eventos de El Niño forte (Tabela 1). O cálculo do SPI foi baseado na metodologia de McKee et al. (1993, 1995) por meio de dados de precipitação pluvial de 34 localidades pertencentes às regiões ocidental e oriental do Tocantins, proveniente de uma série de 1976 a 2012 (37 anos) fornecido pelos seguintes bancos de dados: Agência Nacional de Águas (ANA), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Maiores detalhes em GOIS et al. (2013).

#### 4.3 Modelos de interpolação espacial

Foi aplicado o método de interpolação espacial por Krigagem Ordinária (KO) utilizando o programa ArcGIS versão 10.1 para analisar a distribuição espacial do índice SPI trimestral durante os eventos de El Niño forte para as regiões ocidental e oriental do Tocantins.

A krigagem, ao contrário de outros métodos de interpolação matemática, estima uma matriz de covariância espacial que permite determinar os pesos atribuídos às diferentes amostras, a redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado (GOOVAERST, 1997). No estudo foi adotado o método da KO que permite calcular médias locais, limitando o domínio de estacionaridade da média à vizinhança local centrada no ponto a ser estimado. Os valores da cota  $z$  são estimados em localizações espaciais  $(x_j, y_j)$  não observadas, sem a necessidade de se conhecer a média estacionária  $\mu$ , a partir de uma combinação linear dos valores de um subconjunto amostral local (FELGUEIRAS, 2000). A condição estabelecida no estudo foi à soma dos ponderadores da KO  $\lambda_i(x_j, y_j)$  fosse igual a 1.

O estimador de KO é dado por:

$$z(x_j, y_j) = \sum_{i=1}^{n(j)} \lambda_i(x_j, y_j) * z(x_i, y_i) \quad (1)$$

em que,  $z$  é a cota na posição  $(x_j, y_j)$  e  $\lambda_i(x_j, y_j)$ , o ponderador da KO, para a cota especificada.

#### 4.4 Modelos matemáticos teóricos espaciais

Foram calculados os modelos teóricos transitivos (esférico, exponencial e gaussiano) para as duas regiões citadas anteriormente, com a finalidade de verificar qual (is) o (s) modelo (s) que melhor (es) representa (m) os episódios de El Niño (Tabela 1).

**Tabela 1.** Classificação dos episódios de El Niño (forte) (CLIMANÁLISE, 2014).

Anos de El Niño	Intensidade
1982 – 1983	Forte
1990 – 1993	Forte
1997 – 1998	Forte

Fonte: <http://enos.cptec.inpe.br/>

O modelo esférico é o mais utilizado na literatura. A equação normalizada é dada por:

$$Sph(|h|) = \begin{cases} 0 & , |h|=0 \\ 1,5\left(\frac{|h|}{a}\right) - 0,5\left(\frac{|h|}{a}\right)^3 & , 0 < |h| \leq a \\ 1 & , |h| > a \end{cases} \quad (2)$$

O modelo exponencial atinge o patamar assintoticamente e o parâmetro  $a$  é definido como o alcance prático e  $h$  distância na qual o valor do modelo é 95% do patamar (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). A equação normalizada é dada por:

$$Exp(|h|) = \begin{cases} 0 & , |h|=0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right) & , |h| \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

O modelo gaussiano é um modelo utilizado para modelar fenômenos extremamente contínuos, sendo dada por:

$$\text{Gau}(|h|) = \begin{cases} 0 & , |h|=0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right) & , |h| \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

O modelo gaussiano atinge o patamar assintoticamente e os parâmetros  $a$  e  $h$  são definidos como o alcance e distância similar ao modelo exponencial. Outra característica é seu comportamento parabólico próximo à origem (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

#### 4.5 Estatística descritiva aplicada aos modelos matemáticos teóricos

Foi aplicada à estatística descritiva para as regiões ocidental e oriental do Tocantins, com o objetivo de avaliar o desempenho dos modelos matemáticos teóricos espaciais baseados nos seguintes índices existentes na literatura: Erro Absoluto Médio (EAM), Índice de Concordância ( $d$ ), Erro Padrão da Estimativa (EPE), Erro Quadrático Médio (EQM), Erro Médio (EM), Raiz Quadrada do Erro Quadrado Médio (RQEQM), Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrado Médio Normalizado (RQEMQMN), Variância dos Dados Observados ( $S^2$ ), Desvio Padrão Dados Observados ( $S_x$ ), Média dos Dados Observados ( $\bar{x}$ ) e Média Padronizada (MP). As equações e suas variáveis seguem abaixo.

O Índice de Concordância ( $d$ ) de Willmott et al. (1981) e Willmot e Matsuura (2005) definem matematicamente a dispersão dos valores estimados em relação aos observados. O seu valor varia de 0 a 1, sendo a precisão maior quanto mais próximo de 1 e menor precisão quando próximo a 0. A equação é dada por:

$$d = 1,0 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (5)$$

O EAM, EPE, EQM, EM, RQEQM, RQEMQMN,  $S^2$ ,  $D_x$  e a média dos dados ( $\bar{x}$ ) são definidos por:

$$\begin{aligned} \text{EAM} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i), & \text{EPE} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n-2}}, & \text{EQM} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2, & \text{EM} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i), \\ \text{RQEQM} &= \sqrt{\text{EQM}}, & \text{RQEMQMN} &= \frac{\text{RQEQM}}{Y_{\text{obs. max}} - Y_{\text{obs. min}}}, & S^2 &= \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{n-1}, & S_x &= \sqrt{S^2} \end{aligned}$$

e

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i \quad (6)$$

em que,  $O_i$  valor observado na  $i$ -ésima observação,  $\bar{O}$  média dos valores observados na  $i$ -ésima observação e  $n$  o número de amostras e  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $Y_{\text{obs. max}}$  é o valor máximo e  $Y_{\text{obs. min}}$  é o valor mínimo,  $E_i$  é o valor esperado na  $i$ -ésima observação,  $P_i$  é o valor estimado na  $i$ -ésima observação.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estatísticas descritivas do desempenho do modelo esférico nas regiões ocidental e oriental do TO para o SPI nos episódios de El Niño mostraram variações significativas nas magnitudes dos EAM, EPE, EQM, EM, RQEQM, RQEMQMN e  $S^2$ ,  $S_x$ ,  $\bar{x}$  e MP (Tabelas 2 e 3). O índice  $d$  variou significativamente entre 0,61 a 0,07 (ocidental), seguido de 0,68 a 0,17 (oriental) e, por fim uma diminuição significativa principalmente no ciclo 1997-98 em relação ao modelo esférico na região ocidental.

Os EAM nos inícios dos ciclos de El Niño foram baixos, mostrando que ocorreram diferenças significativas no uso do modelo esférico nos episódios de El Niño forte, principalmente nos ciclos 1990-93 e 1997-98. Os EPE em ambas as regiões ocidental e oriental foram praticamente da mesma ordem de grandeza no início e no fim dos ciclos de El Niño, a exceção foi episódio 1990-93.

O EQM próximo de zero significa que o estimador prevê com precisão. Os EQM mostraram que o modelo esférico foi apropriado na estimativa do SPI apenas no início do El Niño (1982) e no ciclo do El Niño (1997-98), não tendo mesmo êxito para ciclo 1990-93. Os EM positivos do ciclo 1997-98 mostram que previsão foi baixa para o modelo esférico, enquanto os EM negativos mostram que a previsão teve valores elevados para os ciclos 1982-83 e 1990-93.

Os RQEMQMN de ambas as regiões ocidental e oriental do TO não houve variação significativa quando aplicadas ao modelo esférico (Tabelas 2 e 3). Os RQEQM foram significativos nos ciclos, mostrando que o modelo esférico apresenta bom desempenho nos episódios de El Niño.

**Tabela 2.** Estatística descritiva dos valores estimados para modelo esférico na região ocidental do estado do TO, para os episódios de El Niño forte (1982 - 1998) – ME (Magnitude dos Erros).

Anos	d	EAM	EPE	EQM	EM	RQEQM	RQEQMNMN	ME
1982	0,61	0,01	0,66	0,37	0,01	0,61	0,31	maior
1983	0,07	0,02	1,07	0,98	0,02	0,99	0,31	maior
1990	0,42	0,07	1,07	0,98	0,07	0,99	0,29	maior
1991	0,25	0,19	1,17	1,19	0,19	1,09	0,32	maior
1993	0,50	0,16	1,24	1,33	0,16	1,15	0,24	menor
1997	0,07	0,00	0,52	0,23	0,00	0,48	0,28	menor
1998	0,07	-0,01	0,67	0,39	0,01	0,62	0,34	menor

Anos	ME	$S^2$	$S_x$	$\bar{X}$	MP
1982	maior	0,42	0,65	-0,48	-0,01
1983	maior	0,83	0,91	-0,20	-0,01
1990	maior	0,83	0,91	-0,90	-0,05
1991	maior	0,80	0,89	0,25	-0,16
1993	menor	1,48	1,22	-0,87	-0,11
1997	menor	0,23	0,48	0,08	0,00
1998	menor	0,28	0,53	-0,56	0,02

**Tabela 3.** Estatística descritiva dos valores observados estimados para modelo esférico na região oriental do estado do TO, para os episódios de El Niño forte (1982 - 1998) – ME (Magnitude dos Erros).

Anos	d	EAM	EPE	EQM	EM	RQEQM	RQEQMNMN	ME
1982	0,56	0,01	0,62	0,35	-0,01	0,59	0,25	menor
1983	0,23	0,07	1,01	0,92	-0,07	0,96	0,35	menor
1990	0,68	-0,01	0,81	0,58	0,01	0,76	0,22	menor
1991	0,24	0,03	0,93	0,77	-0,03	0,88	0,31	menor
1993	0,26	-0,05	1,48	1,96	0,05	1,40	0,22	maior
1997	0,17	0,08	1,10	1,07	-0,08	1,04	0,22	maior
1998	0,30	0,00	0,73	0,48	0,00	0,69	0,33	maior

Anos	ME	$S^2$	$S_x$	$\bar{X}$	MP
1982	menor	0,40	0,63	-0,20	-0,01
1983	menor	0,76	0,87	-0,13	-0,07
1990	menor	0,78	0,88	-0,90	0,00
1991	menor	0,69	0,83	-0,30	-0,02
1993	maior	1,94	1,39	-0,49	0,03
1997	maior	1,00	1,00	-0,09	-0,08
1998	maior	0,41	0,64	-0,86	-0,01

O desempenho do modelo exponencial, nas regiões ocidental e oriental do TO para o SPI nos episódios de El Niño mostrou novamente variações significativas nas magnitudes dos EAM, EPE, EQM, EM, RQEQM, RQEQMNMN e  $S^2$ ,  $S_x$ ,  $\bar{X}$  e MP (Tabelas 4 e 5). Ao contrário do modelo esférico, o índice d variou significativamente entre 0,68 a 0,17 (ocidental), seguido

de 0,62 a 0,07 (oriental), por fim uma diminuição significativa no ciclo 1997-98 em relação ao modelo exponencial na região oriental.

Os EAM nos inícios dos ciclos de El Niño foram baixos em comparação ao modelo esférico, mostrando que ocorreram diferenças significativas no modelo exponencial entre os episódios de El Niño forte, principalmente nos ciclos 1982-83 e 1997-98, ao contrário do modelo esférico. Vale ressaltar que na região oriental todos os valores de EAM foram positivos. Os EPE em ambas as regiões ocidental e oriental foram praticamente da mesma ordem de grandeza no início e no fim dos ciclos de El Niño, a exceção foi episódio 1990-93, similar ao modelo esférico.

Os EQM mostraram que o modelo exponencial foi apropriado na estimativa do SPI no início do El Niño (1982) e no ciclo do El Niño (1997-98), não tendo mesmo êxito para ciclo 1990-93, resultado similar ao modelo esférico. Os EM positivos do ciclo 1997-98 mostram que a previsão foi baixa para o modelo exponencial, enquanto os EM negativos mostram que a previsão teve valores elevados para ambos os ciclos 1982-83 e 1990-93.

Os RQEMQMN de ambas as regiões ocidental e oriental do TO foram da mesma ordem de grandeza do modelo esférico (Tabelas 4 e 5). Os RQEQM foram significativos nos ciclos, mostrando que o modelo exponencial apresenta bom desempenho nos episódios de El Niño.

**Tabela 4.** Estatística descritiva dos valores estimados para o modelo exponencial na região ocidental do estado do TO, para os episódios de El Niño forte (1982 - 1998) - ME (Magnitude dos Erros).

Anos	d	EAM	EPE	EQM	EM	RQEQM	RQEMQMN	ME
1982	0,56	0,01	0,62	0,35	0,01	0,59	0,25	menor
1983	0,23	0,07	1,01	0,92	0,07	0,96	0,35	menor
1990	0,68	-0,01	0,81	0,58	0,01	0,76	0,22	menor
1991	0,24	0,03	0,93	0,77	0,03	0,88	0,31	menor
1993	0,26	-0,05	1,48	1,96	0,05	1,40	0,22	maior
1997	0,17	0,08	1,10	1,07	0,08	1,04	0,22	maior
1998	0,30	0,00	0,73	0,48	0,00	0,69	0,33	maior

Anos	ME	$S^2$	$S_x$	$\bar{X}$	MP
1982	menor	0,40	0,63	-0,20	-0,01
1983	menor	0,76	0,87	-0,13	-0,07
1990	menor	0,78	0,88	-0,90	0,00
1991	menor	0,69	0,83	-0,30	-0,02
1993	maior	1,94	1,39	-0,49	0,03
1997	maior	1,00	1,00	-0,09	-0,08
1998	maior	0,41	0,64	-0,86	-0,01

**Tabela 5.** Estatística descritiva dos valores observados estimados para o modelo exponencial na região oriental do estado do TO, para os episódios de El Niño forte (1982 - 1998) - ME (Magnitude dos Erros).

Anos	d	EAM	EPE	EQM	EM	RQEQM	RQEMQMN	ME
1982	0,62	0,03	0,66	0,37	-0,03	0,61	0,31	maior
1983	0,07	0,02	1,05	0,95	-0,02	0,97	0,30	maior
1990	0,42	0,07	1,07	0,98	-0,07	0,99	0,29	maior
1991	0,25	0,16	1,13	1,11	-0,16	1,06	0,31	maior
1993	0,50	0,17	1,23	1,32	-0,17	1,15	0,24	maior
1997	0,07	0,00	0,52	0,23	0,00	0,48	0,28	menor
1998	0,07	0,01	0,66	0,38	-0,01	0,62	0,33	menor

Anos	ME	$S^2$	$S_x$	$\bar{X}$	MP
1982	maior	0,42	0,65	-0,48	-0,02
1983	maior	0,83	0,91	-0,20	-0,01
1990	maior	0,83	0,91	-0,90	-0,05
1991	maior	0,80	0,89	0,25	-0,14
1993	maior	1,48	1,22	-0,87	-0,11
1997	menor	0,23	0,48	0,08	0,00
1998	Menor	0,28	0,53	-0,56	0,00

As estatísticas do desempenho do modelo gaussiano, nas regiões ocidental e oriental do TO para o SPI nos episódios de El Niño mostraram variações significativas nas magnitudes dos EAM, EPE, EQM, EM, RQEQM, RQEMQMN e  $S^2$ ,  $S_x$ ,  $\bar{X}$  e MP (Tabelas 6 e 7). O índice d variou significativamente entre 0,62 a 0,07 (ocidental), sendo idêntico ao modelo esférico e similar ao modelo exponencial, seguido de 0,54 a 0,43 (oriental). Essa igualdade encontrada nas regiões, por ambos os modelos, se deve a similaridade entre as formulações e suas respectivas condições (item 2.4).

Os EAM foram todos positivos na região ocidental, enquanto na região oriental ocorreram dois valores negativos. Novamente os EAM nos inícios dos ciclos de El Niño foram baixos, que existem diferenças significativas no modelo gaussiano entre os episódios de El Niño forte, principalmente nos ciclos 1982-83 e 1997-98, ao contrário, dos modelos esférico e exponencial. Os EPE em ambas as regiões ocidental e oriental não foram na mesma ordem de grandeza nos inícios dos ciclos de El Niño, a exceção foi episódio 1990-93.

O EQM próximo de zero significa que o estimador prevê com precisão. Os EQM mostraram que o modelo esférico foi apropriado na estimativa do SPI apenas no início do El Niño (1982) e no ciclo do El Niño (1997-98), não tendo mesmo êxito para ciclo 1990-93. Os EM positivos do ciclo 1997-98 mostram que a previsão foi baixa para modelo esférico, enquanto os EM negativos mostram que a previsão teve valores elevados para os ciclos 1982-83 e 1990-93.

Similar, aos modelos (esférico e exponencial), os RQEMQMN de ambas as regiões ocidental e oriental do TO não houve variação significativa (Tabelas 6 e 7).

Os RQEQM foram significativos nos ciclos, mostrando que o modelo exponencial apresenta bom desempenho nos episódios de El Niño.

**Tabela 6.** Estatística descritiva dos valores estimados para o modelo gaussiano na região ocidental do estado do TO, para os episódios de El Niño forte (1982 - 1998) - ME (Magnitude dos Erros).

Anos	d	EAM	EPE	EQM	EM	RQEQM	RQEMQMN	ME
1982	0,62	0,03	0,66	0,37	-0,03	0,61	0,31	maior
1983	0,07	0,02	1,05	0,95	-0,02	0,97	0,30	maior
1990	0,42	0,07	1,07	0,98	-0,07	0,99	0,29	maior
1991	0,25	0,16	1,13	1,11	-0,16	1,06	0,31	maior
1993	0,50	0,17	1,23	1,32	-0,17	1,15	0,24	maior
1997	0,07	0,00	0,52	0,23	0,00	0,48	0,28	menor
1998	0,07	0,01	0,66	0,38	-0,01	0,62	0,33	menor

Anos	ME	$S^2$	$S_x$	$\bar{X}$	MP
1982	maior	0,42	0,65	-0,48	-0,02
1983	maior	0,83	0,91	-0,20	-0,01
1990	maior	0,83	0,91	-0,90	-0,05
1991	maior	0,80	0,89	0,25	-0,14
1993	maior	1,48	1,22	-0,87	-0,11
1997	menor	0,23	0,48	0,08	0,00
1998	menor	0,28	0,53	-0,56	0,00

**Tabela 7.** Estatística descritiva dos valores observados estimados para o modelo gaussiano na região oriental do estado do TO, para os episódios de El Niño forte (1982 - 1998) - ME (Magnitude dos Erros).

Anos	d	EAM	EPE	EQM	EM	RQEQM	RQEMQMN	ME
1982	0,54	-0,01	0,67	0,39	0,01	0,62	0,31	maior
1983	0,16	0,03	1,01	0,89	-0,03	0,94	0,29	maior
1990	0,43	-0,07	1,12	1,08	-0,07	1,04	0,30	menor
1991	0,25	0,19	1,17	1,19	-0,19	1,09	0,32	maior
1993	0,44	0,14	1,26	1,37	-0,14	1,17	0,24	menor

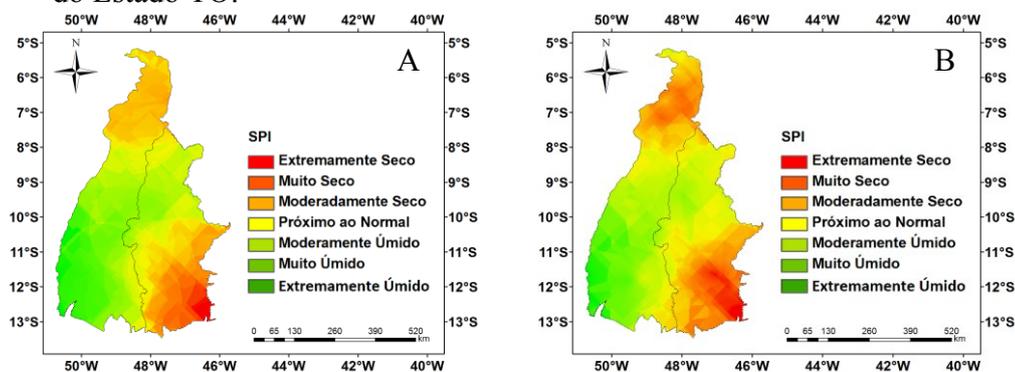
A partir da identificação da influência marcante nas fases iniciais dos ciclos de El Niño pela estatística descritiva. Foram confeccionadas as Figuras de 2 a 4 que mostram as análises espaciais do SPI para ambos os modelos baseado no método de interpolação espacial KO para os anos iniciais do ciclo de El Niño (1982, 1990 e 1993) nas regiões ocidental e oriental do TO.

Observa-se uma forte sensibilidade dos três modelos matemáticos na identificação os eventos severos de secas nas porções (N) e (SE) do TO, seguido das categorias moderadamente seco, muito seco e extremamente seco na porção (SE) do Estado. Resultados similares foram obtidos por Gois et al. (2013), apesar do método de interpolação usado pelos autores ser o método de interpolação Spline, que verificaram as maiores severidades de seca no ano de 1982 nas porções (E), (NE), (NW) e (SE) do TO, correspondentes às microrregiões Bico do Papagaio, Araguaína, Miracema do Tocantins, Porto Nacional, Jalapão, Dianópolis e Gurupi. As ocorrências de eventos de seca nas categorias moderadamente a extremamente

seca, seguidos por uma pequena faixa de eventos moderadamente a extremamente úmidos nas microrregiões Bico do Papagaio e Rio Formoso nas porções (N) e (SW) do Estado do TO.

Na krigagem a variação espacial é quantificada por um semivariograma. O semivariograma é um gráfico de dispersão da semivariância versus distância dos pontos amostrados, sendo que a semivariância é uma medida de dispersão, a metade da variância. O semivariograma serve para analisar a dependência espacial entre as amostras. Enquanto o Spline consiste na estimativa de valores usando uma função matemática que minimiza a curvatura da superfície resultando em uma superfície suave que passa exatamente pelos pontos de entrada (MARCUIZZO et al., 2011, 2012). A similaridade entre os resultados obtidos por ambos os estudos na espacialização do índice SPI para o TO se deve ao estado não possuir uma topografia complexa, pois sua topografia é formada por chapadões e planícies.

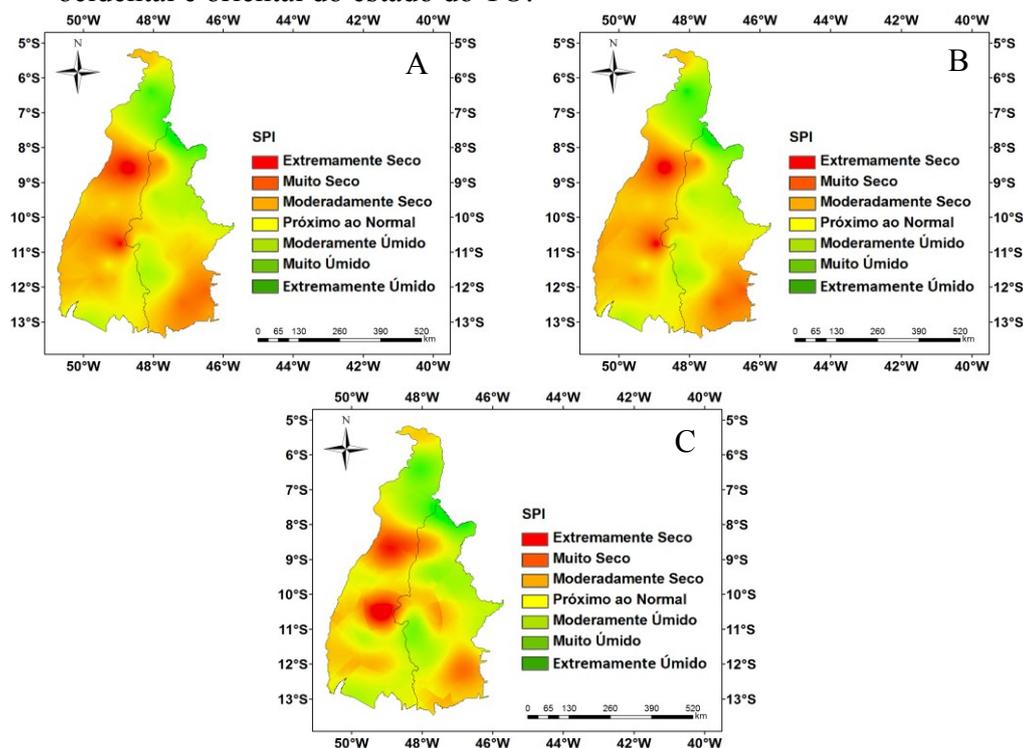
**Figura 2.** Análise espacial do SPI pelo modelo esférico (A) e exponencial (B) baseado no método de KO para o ano de 1982 (El Niño forte) nas regiões ocidental e oriental do Estado TO.



Na análise espacial do índice SPI pelos modelos esférico, exponencial e gaussiano no El Niño forte de 1990 (Figura 3) mostra que ambos os modelos (esférico e exponencial) identificaram com uma maior abrangência os eventos categorizados como moderadamente seco nas porções (N), (SE), (W) e (SW) do TO, seguido das categorias muito seco e extremamente seco. Por sua vez, o modelo gaussiano identificou as mesmas porções, no entanto, com uma menor abrangência. As categorias denominadas de moderadamente seco e muito seco nas regiões ocidental e oriental, porém, observa-se a categoria extremamente seco nas porções (NW) e (W) do TO.

O modelo gaussiano identificou a existência de eventos moderadamente a extremamente seco nas porções (W), (E), (SE) e (SW) do TO. Gois et al. (2013) observaram durante o episódio de El Niño forte para o ano de 1990, eventos nas categorias extremamente seco a muito seco nas microrregiões Bico do Papagaio na porção (N), Miracema do Tocantins porção (NW), Araguaína porção (NE) e em Dianópolis porção (SE). Foi identificada uma faixa de eventos moderadamente a extremamente úmidas nas porções (N), (NW) e nas microrregiões Jalapão na porção (E), ao Sul da microrregião de Dianópolis e (SW) das microrregiões de Gurupi e Rio Formoso. A ocorrência das categorias moderadamente seca e próximos ao normal foram na maioria das microrregiões do estado do TO. Apesar da ocorrência do episódio foi observada a existência de categorias moderadamente a extremamente úmidas em algumas das microrregiões do TO.

**Figura 3.** Análise espacial do SPI pelo modelo esférico (A), exponencial (B) e gaussiano (C) com base no método de KO para o ano de 1990 (El Niño forte) nas regiões ocidental e oriental do estado do TO.



Na análise espacial do índice SPI pelos modelos (esférico e exponencial) para o El Niño forte (1993), (Figura 4). De modo geral, ambos os modelos apresentam uma similaridade, quanta a identificação dos eventos de seca moderada a muito seco nas porções (N) e (SE). Observa-se a ocorrência de eventos extremamente seco na porção (SW) do Tocantins, eventos próximos da normal e moderadamente úmido a extremamente úmido foram observados nas porções (N), (S), (L), (W), (SW) e (SE) do estado. Gois et al. (2013) mostraram a ocorrência de eventos de secas moderada e extrema, seguida de eventos nas categorias moderadamente úmido a extremamente úmidos nos anos de 1993, 97 e 98 em algumas das microrregiões do estado do TO.

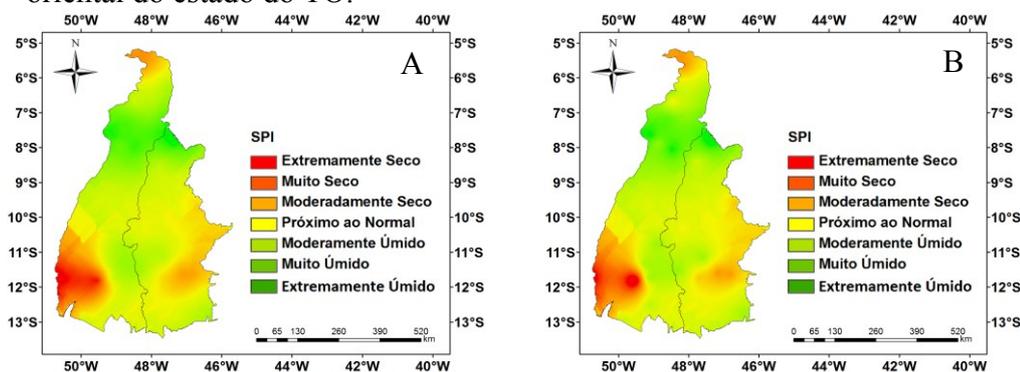
Estas categorias moderadamente úmida encontradas em certas porções deste trabalho, estão correlacionadas às mudanças de fases (positivo-negativa) do El Niño. Apesar na literatura mostrar a influência dos eventos de extremos de ENOS na precipitação, há uma variabilidade inter-eventos do sinal do fenômeno (DRUMOND; AMBRIZZI, 2003).

Segundo Molion (2005) nos El Niños de 1982/83 e 1992/93, as anomalias positivas da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) não foram evidentes devido à presença dos aerossóis das erupções dos vulcões El Chichón (México, abril de 1982) e Monte Pinatubo (Filipinas, junho de 1991) que resfriaram o Planeta Terra por um período de 2 a 3 anos. Os episódios de El Niño (1982, 1990 e 1993) neste trabalho, foram caracterizados por d, EAM, EPE, EQM e EM superiores aos demais anos pertencentes aos ciclos (Tabela 2-7). Baseado no trabalho de Molion (2005), os resultados obtidos podem estar não só atribuídos a simples aleatoriedade dos eventos de chuva causados pelos seus sistemas produtores, mas também as concentrações de aerossóis na atmosfera durante o período.

O padrão de chuva na região norte e nordeste da América do Sul (AS) é aumentada mediante a configuração do gradiente interbacias do Pacífico e Atlântico durante a fase inicial

do ENOS. Nesse caso, uma possível explicação é que o Modo Equatorial no Atlântico (MEA) de sinal contrário ao ENOS durante sua fase inicial cria condições favoráveis para o desenvolvimento de um Gradiente Inter-hemisférico no Atlântico Tropical (GITAT) atuando no mesmo sentido do gradiente interbacias, e contribui para intensificar o efeito do El Niño na precipitação. Por outro lado, para os eventos de ENOS em que o gradiente se forma em sua fase de decaimento, o impacto no regime de chuva é mais significativo na região norte e centro-oeste da bacia. Uma possível explicação para essas diferenças está associada às mudanças que ocorrem na circulação atmosférica leste-oeste associada ao gradiente leste-oeste de anomalias da TSM (ARAÚJO et al., 2013).

**Figura 4.** Análise espacial do SPI pelo modelo esférico (A) e exponencial (B) com base no método de KO para o ano de 1993 (El Niño forte) nas mesorregiões ocidental e oriental do estado do TO.



## 6 CONCLUSÕES

O método de Krigagem Ordinária aplicado na interpolação do índice SPI no período de 37 anos mostra que os modelos (esférico e exponencial) são capazes de identificar com acurácia os eventos de severidade de seca em episódios de El Niño forte em ambas as regiões ocidental e oriental do estado do Tocantins.

O desempenho dos modelos matemáticos transitivos teóricos baseados em estatística descritiva mostra que os modelos (esférico e exponencial) são similares quanto à magnitude dos erros estatísticos e com desempenho considerado ótimo para os episódios iniciais dos ciclos de 1982-83 e 1990-93, a exceção é o ciclo 1997-98, seguido do modelo gaussiano com desempenho abaixo em comparação aos demais.

Os modelos matemáticos teóricos (esférico e exponencial) conseguem identificar espacialmente os eventos de seca no estado do Tocantins nos anos iniciais dos ciclos do El Niño forte com maior acurácia em comparação ao modelo gaussiano.

Vale ressaltar a aplicação da metodologia adotada neste estudo para os eventos de La Niña e, assim melhorar o entendimento dos padrões de chuva e, consequentemente avaliação do índice SPI no estado do Tocantins.

## 7 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, R. G.; ANDREOLI, R. V.; CANDIDO, L. A.; KAYANO, M. T.; SOUZA, R. A. F. A Influência do evento El Niño-Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as

regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 43, p. 469-480, 2013.

ASSAD, E. D.; MACEDO, M. A.; ZULLO JÚNIOR, J.; PINTO, H. S.; BRUNINI, O. Avaliação de métodos geoestatísticos na espacialização de índices agrometeorológicos para definir riscos climáticos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 161-171, 2003.

CLIMANÁLISE. Produtos Climanálise INPE/CPTEC, 2014. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~reclimanl/boletim/>>. Acesso em: 3 mar. 2014.

DELGADO, R. C.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; GOIS, G.; LYRA, G. B. Cenários climáticos da radiação solar global baseados no modelo regional HadRM3 para o Estado do Acre. **Revista Floresta e Ambiente**, v. 21, p. 417-428, 2014.

DRUMOND, A. R. M.; AMBRIZZI, T. Estudo observacional e numérico da variação da circulação atmosférica nas Américas em episódios extremos de oscilação sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 18, p. 1-12, 2003.

FELGUEIRAS, C. **Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em Sistemas de Informação Geográfica: o paradigma geoestatístico por indicação**. 2000, p 60-69, Tese (Doutorado em Computação Aplicada), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B. A. O. Estimativa da variação da produtividade do arroz em diferentes escalas temporais do índice SPI. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, p. 335-343, 2011.

GOIS, G.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; DELGADO, R. C.; MORAES, M. Severidade da seca no Estado do Tocantins e suas relações com os eventos de El Niño. **Revista Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, p. 1973-1989, 2013.

GOIS, G.; SOUZA, J. L.; SILVA, P. R. T.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. Caracterização da desertificação no estado de Alagoas utilizando variáveis climáticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 20, p. 301-314, 2005.

GOODCHILD, M. F. Geographical data modeling. **Computers & Geosciences**, New York, v. 18, p. 104-408, 1992.

GOOVAERST, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 481 p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=to>> Acesso em: 25 jun. 2015.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

MARCUZZO, F. F. N.; GOULARTE, E. R. P. Caracterização do ano hidrológico e mapeamento espacial das chuvas nos períodos úmido e seco do estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 6, p. 91-99, 2013.

MARCUZZO, F. F. N.; ANDRADE, L. R.; MELO, D. C. R. Métodos de interpolação matemática no mapeamento de chuvas do estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 4, p. 793-804, 2011

MARCUZZO, F. F. N.; MELO, D. C. R.; COSTA, H. C. Sazonalidade e distribuição espaço-temporal das chuvas no bioma do Cerrado do estado do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 17, p. 77-85, 2012.

MARCUZZO, F. F. N.; ROMERO, V.; MURILO, R. D. C. Tendência do número de dias de chuva no estado do Tocantins e a relação dos seus extremos com o índice Oceânico Niño. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 32, n. 1, p. 1-16, 2014.

McKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8., 1993, Boston. **Proceedings...** Boston: AMS, 1993. p. 179-184.

McKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. Drought monitoring with multiple time scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 9., 1995, Dallas. **Preprints...** Dallas: American Meteorological Society, 1995. p. 233-236

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, p.925-933, 2003.

MELLO, C. R.; SÁ, M. A. C.; CURI, N.; MELLO, J. M.; VIOLA, M. R. Erosividade mensal e anual da chuva no estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 537-545, 2007.

MOLION, L. C. B. Aquecimento global, El Niños, manchas solares, vulcões e oscilação Decadal do Pacífico. **Revista Climanalise**, Cachoeira Paulista, v. 3, n. 2, p. 1-5, 2005.

Disponível em:

<<http://www.fakeclimate.com/arquivos/MaterialDid%C3%A1ticoClimaGeo/MudClim/02-MatDid/A09A-AquecGlobal-Molion.pdf>>. Acesso em: 8 abr. 2014.

SILVA, A. M. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, Amsterdam, v. 57, p. 251-259, 2004.

SOUZA, G. S.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; ROCHA, W. S. D. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 11, p. 73-81, 2010.

VIEIRA, S. R.; MILLETE, J.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W.D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVAREZ VENEGAS, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSETA, L. M. (Ed.).

**Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 2, p.1-46, 2002.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. D.; PINTO, D. B.; MELLO, J. D.; ÁVILA, L. F. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n. 9, p. 970-978, 2010.

WILLMOT, C.J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, Oldendorf/Luhe, v. 30, p. 79-82, 2005.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.

XAVIER, A. C.; CECÍLIO, R. A.; LIMA, J. S. D. S. Módulos em MATLAB para interpolação espacial pelo método de krigagem ordinária e do inverso da distância. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 62/1, p. 67-76, 2011.