

AVALIAÇÃO DE MODELOS GEOESTATÍSTICOS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL PARA O ESTADO DO ESPÍRITO SANTO

Autores: Kennedy Ribeiro da Silva¹, Edher de Souza Ferreira de Miranda¹, Fabricia Benda de Oliveira¹

¹Universidade Federal do Espírito Santo/Programa de Pós-graduação em Geografia, Avenida Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras - 29075-910 – Vitória - ES, Brasil, kennedyribeirosilva@gmail.com, doutorado.edher@gmail.com, fabricia.oliveira@ufes.br

Resumo

O trabalho teve como objetivo modelar a evapotranspiração potencial (ETP) no Espírito Santo, aplicando técnicas geoestatísticas para analisar sua variabilidade espacial. A metodologia utilizou dados de 110 estações meteorológicas. A ETP foi calculada pelo método de Thornthwaite. A análise estatística inicial revelou uma média variabilidade espacial (coeficiente de variação de 14,47%). Semivariogramas teóricos foram ajustados, e embora o modelo esférico tenha mostrado o maior coeficiente de determinação, a validação cruzada indicou que o modelo exponencial foi o mais eficiente, apresentando o menor erro de predição. A pesquisa demonstrou a eficácia da geoestatística para modelar a ETP, gerando um modelo espacial para o planejamento da gestão de recursos hídricos e agrícolas no estado.

Palavras-chave: Semivariograma, estatística descritiva, validação cruzada

Área do Conhecimento: Ciências Humanas - Geografia

Introdução

A evapotranspiração potencial (ETP) representa a máxima demanda evaporativa da atmosfera, sua medição e modelagem são cruciais para o planejamento e gestão de recursos hídricos, irrigação e estudos do balanço hídrico. A compreensão precisa da ETP é vital para mitigar os efeitos da variabilidade climática em ecossistemas e sistemas agrícolas, especialmente em cenários de processos de irrigação (ZANETTI *et al.*, 2005).

Embora existam métodos de medição e estimativa pontual da ETP, a sua variabilidade espacial exige o uso de técnicas avançadas como a geoestatística, que possibilita mapear e prever a distribuição da ETP em grandes áreas. Esses modelos permitem a interpolação de dados pontuais de estações meteorológicas, criando superfícies contínuas de informação.

Diversos estudos já demonstraram a eficácia da geoestatística na modelagem de dados climáticos, com o uso da krigagem, que tem sido amplamente utilizada para mapear a precipitação e a temperatura com alta precisão (RIGO *et al.*, 2017). Da mesma forma, a interpolação de dados de ETP por meio de modelos geoestatísticos tem se mostrado uma ferramenta robusta para a análise espacial (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo ajustar e validar modelos geoestatísticos para o mapeamento da ETP no estado do Espírito Santo, que permitirá a geração de mapas de alta resolução para auxiliar no planejamento agrícola e hidrológico.

Metodologia

Área de Estudo e Disponibilidade de Dados:

A pesquisa foi desenvolvida para o estado do Espírito Santo, localizado na Região Sudeste do Brasil, formada por uma notável diversidade geográfica e hídrica dos ecossistemas.

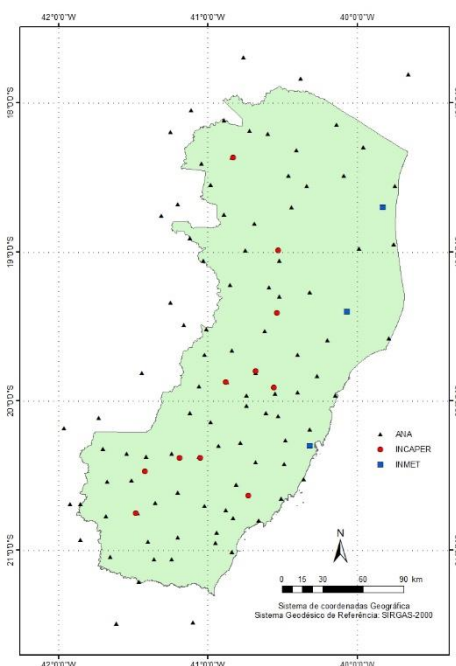
A maior parte do território possui um clima tropical úmido, com temperaturas médias anuais variando entre 23°C e 25°C, com precipitações que se concentram na faixa litorânea e nas encostas das serras, onde a orografia intensifica as chuvas, contrastando com as áreas de planalto e interior do estado com menores volumes de precipitação.

Foram utilizados dados das normais climatológicas (30 anos) da temperatura do ar de 110 estações meteorológicas distribuídas no estado do Espírito Santo e no entorno do estado, de responsabilidade da Agência Nacional da Água (ANA, 2025), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025) e do

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER, 2025), conforme Figura 01.

Figura 01 – Localização das estações meteorológicas utilizadas na pesquisa.



Fonte: ANA (2025), INMET (2025) e INCAPER (2025).

Determinação da Evapotranspiração Potencial e Estatística Descritiva:

A Evapotranspiração Potencial foi calculada utilizando o método de Thornthwaite (1948), com dados normais de temperatura do ar de 110 estações meteorológicas, conforme Equações 1 e 2.

$$\begin{aligned} \text{ETp} &= 16 (10 \text{ Tm/I})^a & (0 \leq \text{Tm} < 26,5^\circ\text{C}) & \text{Equação 1} \\ \text{ETp} &= -415,85 + 32,24\text{Tm} - 0,43\text{Tm}^2 & (\text{Tm} \geq 26,5^\circ\text{C}) & \text{Equação 2} \end{aligned}$$

Após a determinação da Evapotranspiração Potencial para cada estação meteorológica, foi aplicada a estatística descritiva aos dados, com intuito de verificar se os dados possuem normalidade. Foram calculados: média, desvio padrão, variância, valor mínimo, valor máximo, assimetria, curtose, coeficiente de variação e histograma.

Modelagem Geostatística e Espacial:

Com os dados de Evapotranspiração Potencial (ETP), foram ajustados os semivariogramas teórico e experimental, para os modelos esférico, exponencial e gaussiano no *software* GS+ e registrados os parâmetros: alcance, patamar e efeito pepita.

Para a seleção do ajuste do melhor semivariograma, foi aplicada a validação cruzada e calculada as seguintes estatísticas: coeficiente de regressão, coeficiente de determinação (r^2), erro padrão e erro padrão de predição.

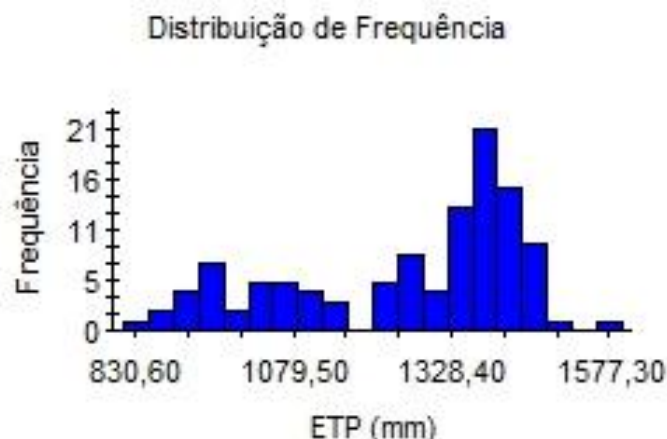
Posteriormente foi interpolado o modelo espacial que melhor se ajustou ao semivariograma selecionado, com base nas estatísticas calculadas na validação cruzada.

Resultados e Discussão

Na Figura 02 é apresentado o histograma para a variável evapotranspiração potencial, que demonstra que os dados históricos de 30 anos, possuem uma certa distribuição normal.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Figura 02 – Histograma da evapotranspiração potencial para o Espírito Santo



Na Tabela 01 são apresentados os valores das estatísticas descritivas da variável evapotranspiração potencial.

Tab 01 – Estatísticas descritivas dos dados de ETP

Estatística	Resultados
Média	1.259,632 mm
Desvio Padrão	182,346 mm
Variância	3.3250,16 mm ²
Valor mínimo	830,60 mm
Valor máximo	1.577,30 mm
Assimetria	-0,75
Curtose	-0,74
CV	14,47%

Com base nos resultados das estatísticas descritivas apresentados, é possível inferir o seguinte sobre a distribuição dos dados, sendo:

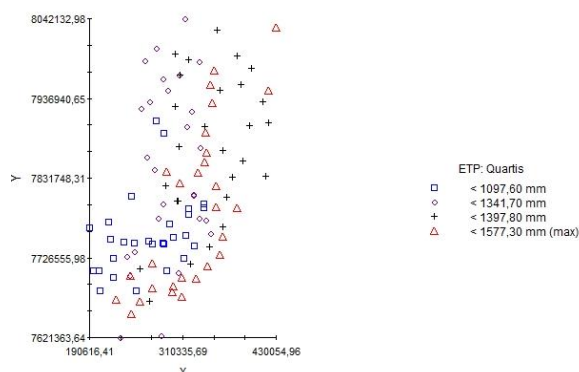
- Média indica o valor central dos dados, sendo a ETP média anual de aproximadamente 1260 mm;
- O desvio padrão mede a dispersão dos dados em relação à média, sendo o valor de 182,346 mm, na qual sugere que a maioria dos dados (cerca de 68% em uma distribuição normal) está dentro do intervalo de 1077,28 mm ($1259,632 - 182,346$) e 1441,97 mm ($1259,632 + 182,346$);
- Variância de 33250,16 mm² é o desvio padrão ao quadrado, sendo uma medida da dispersão total dos dados, mas em uma unidade ao quadrado, o que a torna menos intuitiva para interpretação direta do que o desvio padrão;
- O valor mínimo de 830,60 mm e o valor máximo de 1577,30 mm, definem o intervalo total dos dados, sendo que a diferença entre o mínimo e o máximo é de 746,70 mm, demonstrando a amplitude da variação da ETP;
- O coeficiente de variação foi de 14,47%, caracterizado como médio, segundo a classificação de WARRICK; NIELSEN (1980);
- Quanto o coeficiente de assimetria de -0,75, é possível inferir que a maior parte dos dados se concentram do lado esquerdo e os maiores valores se concentram no lado direito da distribuição, corroborando para que a média seja menor que a mediana, caracterizando uma assimetria negativa;
- Com a curtose de -0,74 foi possível identificar que a distribuição é mais plana, ou seja, platicúrtica, com pico baixo e mais largo, o que sugere que os dados estão menos concentrados no entorno da média.

A Figura 03, apresenta a distribuição dos dados em diferentes intervalos, demonstrando que o estado do Espírito Santo, possui uma grande variabilidade espacial, pois a evapotranspiração potencial

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

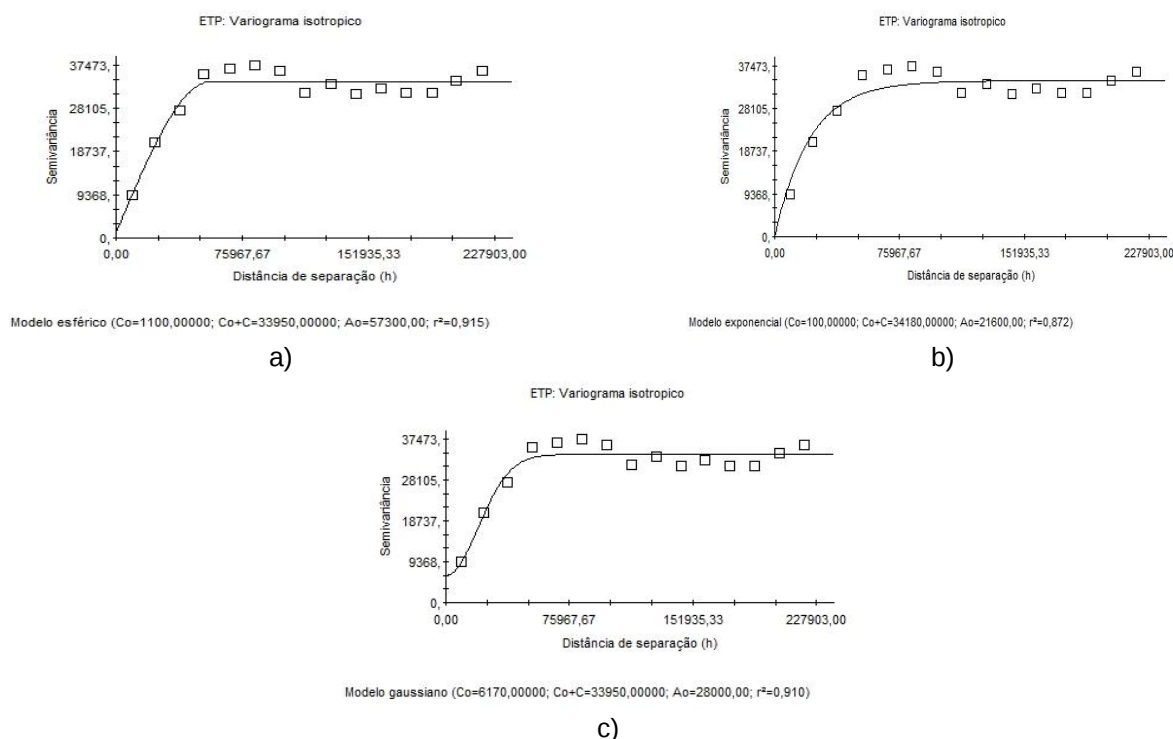
está relacionada com a temperatura do ar, devido à grande variação do relevo no Espírito Santo segundo Castro *et al.* (2010).

Figura 03 – Distribuição dos dados em diferentes intervalos quartílicos



Na Figura 04, são apresentados os semivariogramas ajustados, contendo os valores do efeito pepita (C_0), alcance (A_0), patamar (C_0+C) e coeficiente de determinação.

Figura 04 - Modelos de semivariogramas a) Esférico, b) Exponencial e c) Gaussiano, ajustados para a variável ETP



Na Tabela 02 são apresentados os valores de ajuste dos semivariogramas para cada modelo geoestatístico, para a variável ETP anual.

Tabela 02 – Tabela com parâmetros dos semivariogramas ajustados

Modelos	C_0	C_0+C	A	R^2	IDE
Esférico	1100	33950	57300	0,915	0,968
Exponencial	100	34180	64800	0,872	0,997
Gaussiano	6170	33950	48497	0,910	0,818

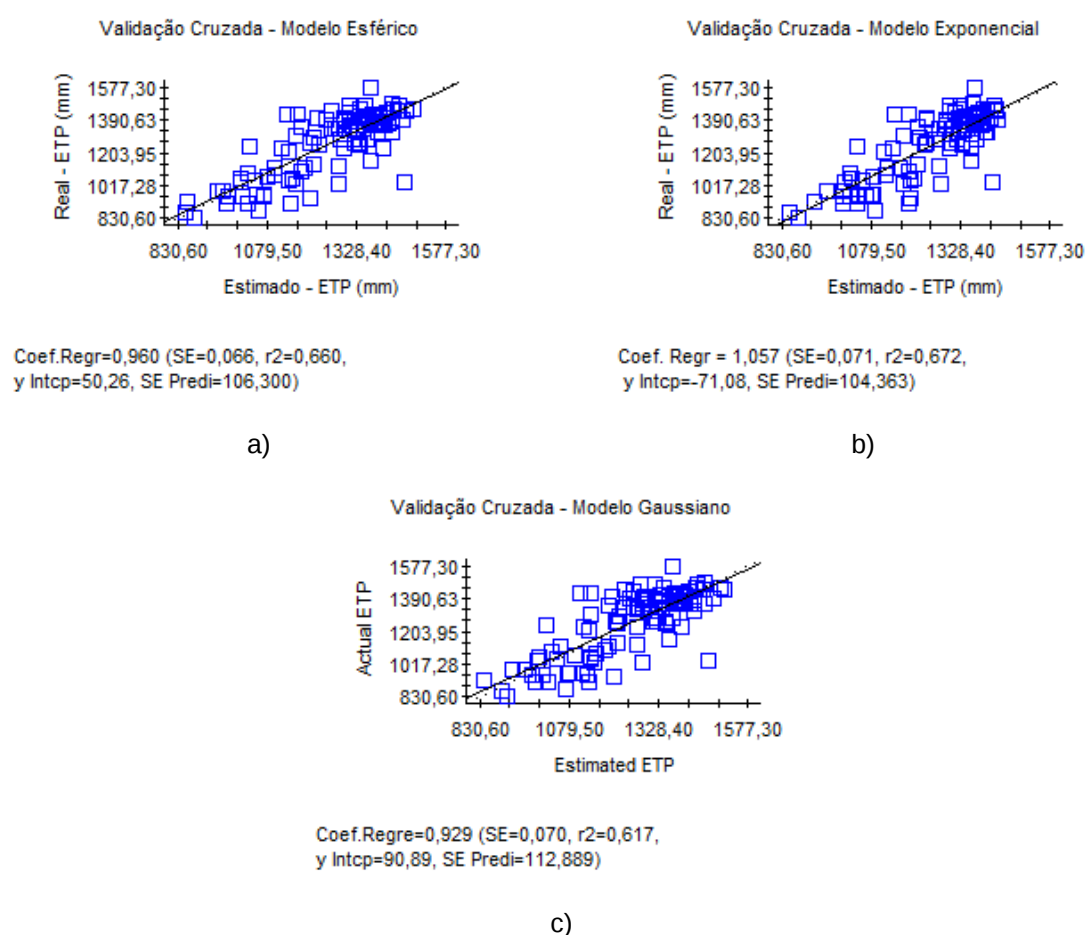
Obs.: C_0 = efeito pepita, C_0+C = Patamar, A = Alcance, R^2 = Coef. Determinação e IDE = Índice dependência espacial

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Os resultados apresentados na Tabela 02, demonstram que o melhor modelo ajustado aos dados foi o esférico, com r^2 de 0,915 e contendo um IDE classificado como forte segundo a classificação de Zimback (2001), corroborando com os resultados encontrados por Gardiman Junior *et al.* (2012), que verificaram que a krigagem apresenta boas estimativas na utilização da geoestatística.

Na Figura 05, são apresentados os resultados da validação cruzada, realizados após o ajuste de cada modelo geoestatístico da krigagem.

Figura 05 - Validação cruzada dos semivariograma a) esférico, b) exponencial e c) guassiano

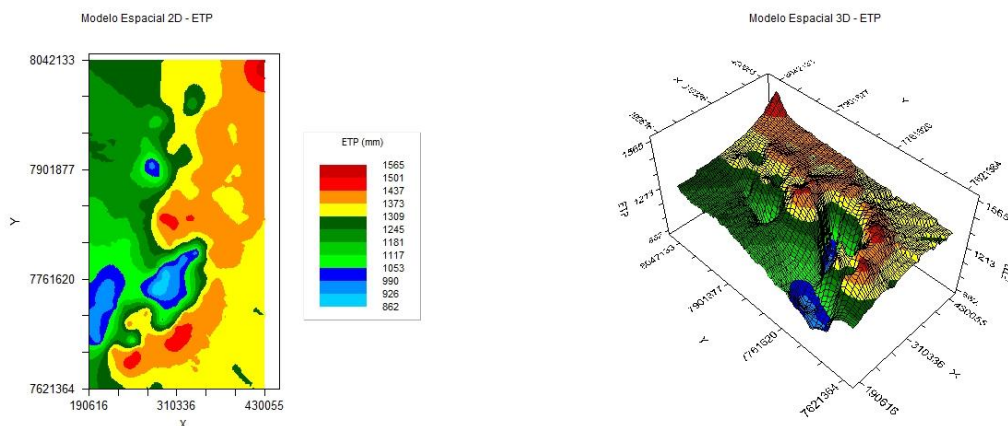


Avaliando a inclinação da reta de regressão e a relação entre suas variáveis, o modelo exponencial foi o que apresentou o melhor resultado, com o valor de coeficiente de regressão de 1,057, sendo excelente, pois está muito próximo de 1. O r^2 com valor de 0,672 (ou 67,2%) é considerado bom para estudos ambientais ou agrícolas, isso significa que 67,2% das mudanças na sua variável Y podem ser explicadas pelas mudanças na variável X. O erro de predição do modelo exponencial foi o menor, com um valor de 104,363 mm, indicando que em média, as suas previsões terão um erro de aproximadamente 104,363 mm para mais ou para menos.

Os resultados da validação cruzada, corroboram com os trabalhos de Castro *et al.* (2010) e Silva *et.al.* (2011), quando observado que a técnica de krigagem indica, uma excelente eficiência nas estimativas no estado do Espírito Santo para as variáveis precipitação, evapotranspiração real, deficiência hídrica, excedente hídrico e disponibilidade hídrica na espacialização das variáveis climatológicas.

Na Figura 06 é apresentado o modelo espacial da krigagem exponencial com base no melhor ajuste, após aplicação da validação cruzada.

Figura 06 - Modelo espacial gerado através de variograma exponencial em 2D e 3D para o estado Espírito Santo



O modelo de distribuição espacial da ETP no Espírito Santo, demonstra que as maiores taxas de evapotranspiração ocorrem no litoral, enquanto as menores são encontradas nas regiões montanhosas. Essa variação está diretamente relacionada com a influência do relevo, que causa uma redução da temperatura e da ETP em altitudes mais elevadas, corroborando com os resultados encontrados nos trabalhos de Castro *et al.* (2010) e Silva *et al.* (2011).

Conclusão

O modelo que melhor se ajustou a variável ETP foi a krigagem exponencial, por apresentar o menor erro de predição e melhor coeficiente de determinação.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Série Histórica climatológica [Dados Brutos]. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 01 agosto. 2025.

CASTRO, F. S.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; XAVIER, A. C. 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, 2010.

GARDIMAN JUNIOR, B. S.; MAGALHÃES, I. A. L.; FREITAS, C. A. A.; CECÍLIO, R. A. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES). **Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 8, n. 1. p. 61-71, 2012.

INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL (INCAPER). Boletins Agroclimáticos. [Relatório]. Vitória, ES, 2025. Disponível em: <https://www.incaper.es.gov.br/boletins>. Acesso em: 01 agosto. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Dados históricos da Estação Meteorológica do Espírito Santo. [Dados Brutos]. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 01 agosto. 2025.

OLIVEIRA, G. S. et al. Geoestatística aplicada à estimativa de evapotranspiração em áreas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 4, p. 289-296, 2021.

RIGO, P. C. et al. Avaliação do desempenho de métodos geoestatísticos na interpolação espacial da precipitação anual. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 4, p. 733-742, 2017.

SILVA, K. R.; CECÍLIO, R. A.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; GARCIA, G. O. Interpolação Espacial da Precipitação no Estado do Espírito Santo. **Revista Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 417-427, 2011.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

THORNTHWAITE, C. W. (1948). **An approach toward a rational classification of climate.** *Geographical Review*, 38, 55–94.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (Ed.). **Applications of soil physics.** Academic Press, Nova York. p. 319-344.

ZANETTI, S. S.; PRUSKI, F. F.; MOREIRA, M. C.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, D. D. Programa computacional para geração de séries sintéticas de precipitação. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.1, p.96-104, 2005.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise Espacial de Atributos Químicos de Solos Para Fins de Mapeamento da Fertilidade do Solo.** 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.