

# MAPEAMENTO DO NÍVEL FREÁTICO COM USO DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS COMO INFORMAÇÃO AUXILIAR

Lucas Vituri Santarosa<sup>1</sup>, Rodrigo Lilla Manzione<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente – UNESP/IGCE. Rio Claro (SP) [lucasviturisantarosa@gmail.com](mailto:lucasviturisantarosa@gmail.com)

<sup>2</sup> Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã – UNESP. Tupã (SP) [rlmanzione@gmail.com](mailto:rlmanzione@gmail.com)

**Palavras-Chave:** Modelagem hidrogeológica; Geoestatística; Cokrigagem

## INTRODUÇÃO

Os métodos estocásticos aplicados à gestão dos recursos hídricos subterrâneos são fundamentais para analisar a vulnerabilidade do aquífero e a variação temporal e espacial do nível freático, permitindo a tomada de decisões estratégicas a partir de um plano de manejo dos recursos hídricos (KNOTTERS; BIERKENS, 2001). A complexidade da dinâmica das águas subterrâneas, governada pela combinação complexa de fatores naturais e antrópicos, necessita de instrumentos com capacidade de modelar e explicar sua dinâmica natural (KRESIC; MIKSZEWSKI, 2013). Portanto, os modelos geoestatísticos têm sido amplamente utilizados pela capacidade de prever uma variável com precisão, calculando as incertezas envolvidas (KITANIDIS, 1997; YAMAMOTO; LANDIM, 2015). A aplicação da geoestatísticas no monitoramento dos aquíferos pode facilitar o levantamento de informações ao minimizar dificuldades decorrentes dos custos e limitações naturais (KITANIDIS, 1997).

Modelos geoestatísticos que consideram a relação entre variáveis na estimativa de uma variável de interesse podem produzir estimativas melhores se a correlação for suficientemente forte e houver sentido físico nessa relação. Produtos de sensoriamento remoto ou mesmo levantamentos detalhados de variáveis de baixo custo de amostragem tem sido utilizado para esse propósito com sucesso ao aplicar interpoladores como a cokrigagem (AHMAD; SEDGHAMIZ, 2008; ROCHA et al., 2009; HOOSHMAND et al., 2011; SANTAROSA; MANZIONE, 2018), krigagem universal (KAMBHAMMETTU et al., 2011; MANZIONE et al., 2012), krigagem com deriva externa (DESBARATS et al., 2002; PETERSON et al., 2011), entre outras abordagens.

Este trabalho considerou como variável auxiliar propriedades físicas do solo e a altimetria na interpolação de níveis freáticos superficiais na Estação Ecológica de Santa Bárbara, Estado de São Paulo, Brasil. O objetivo foi testar a eficiência da porcentagem de areia (ARE), relevo (SRTM) e resistência do solo a penetração (RP) como variáveis auxiliares para mensurar a variabilidade espacial os níveis freáticos em área do Sistema Aquífero Bauru (SAB) e verificar a variação do desvio padrão.

## METODOLOGIA

A Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB) está localizada no município de Águas de Santa Bárbara, Estado de São Paulo, Brasil, sobre o Sistema Aquífero Bauru (SAB). Foram utilizadas as medições do nível freático de 48 poços de monitoramento (Figura 1), com medições realizadas dia 05 de setembro de 2014 a 31 de maio de 2016. Para este estudo foram selecionadas duas medições que representam período de elevação do nível freático no ano hidrológicos 2015/2016, de 16 de outubro de 2015 e 03 de dezembro de 2015.

As propriedades do solo utilizadas neste estudo foram a porcentagem de areia (ARE) e a resistência do solo a penetração (RP). Foram coletadas 113 amostras de solo a uma profundidade de 50 a 100 cm para análise granulométrica, a resistência do solo a penetração foi aferida em 70 pontos de amostragem por um medidor eletrônico automático modelo Falker Solotrack. Também foi utilizada como informação auxilia o Modelo

Digital de Elevação (MDE) do levantamento orbital com resolução de 30 metros do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

Para análise espacial dos dados geográficos, foi considerado o formalismo da aplicação da geoestatística seguindo a metodologia detalhada em Santarosa e Manzione (2018).

A eficiência dos modelos geoestísticos utilizados na interpolação dos níveis freáticos foram testados por mapas de erro com a variação do desvio padrão da interpolação. O valor de desvio padrão foi analisado de três formas: (1) na validação cruzada, que calcula o desvio médio; (2) a variação do desvio padrão na área total das bacias e; (3) a variação do desvio padrão no limite amostral do monitoramento do nível freático, ou seja, próxima a origem dos dados de profundidade do nível freático (Figura 2).

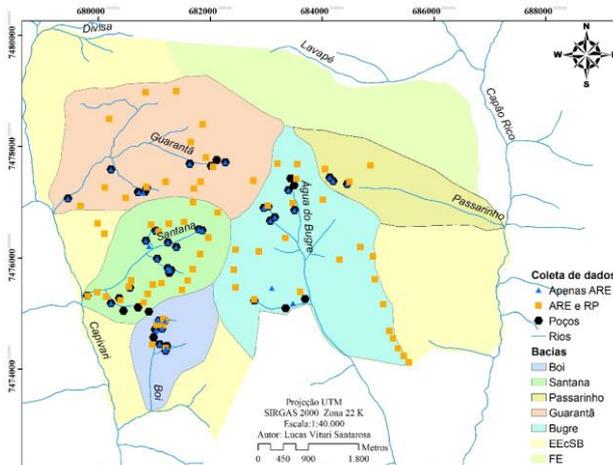


Figura 1. Bacias, poços de monitoramento e pontos de coleta de dados na EECSB. RP: Resistência a penetração; ARE: Porcentagem de areia.

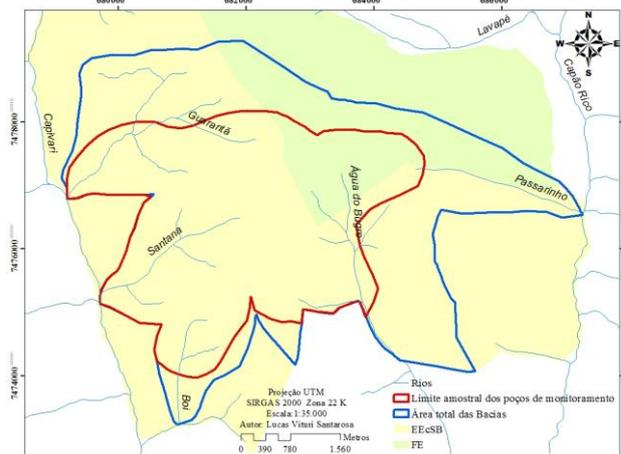


Figura 2. Áreas de análise do desvio padrão, área total e área amostral do monitoramento do nível freático

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As variáveis auxiliares foram testadas em função do valor do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para verificar o grau de correlação com o nível freático médio (Tabela 1). Nota-se que a RP e a SRTM apresentam baixo grau de correlação com o nível freático.

Tabela 1: Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) calculado entre o nível freático e a variável auxiliar

Variável Auxiliar	$R^2$
SRTM	0,64
ARE	0,86
RP	0,45

RP: Resistência a penetração; ARE: porcentagem de areia; SRTM: Altimetria do produto do SRTM

Tabela 2: Parâmetros variográficos

Interpolador	Variável Auxiliar	Medições	KG				
			KG	COKG			
			RP	ARE	SRTM		
Modelo	A <sub>0</sub> (m)	16/10/2015	GAU	CIR	EXP	EXP	
			784,40	1724,5	2917,60	3044,00	
			C <sub>0</sub>	0,10	0,05	0,40	0,08
			C	2,21	1,98	1,84	2,14
Modelo	A <sub>0</sub> (m)	03/12/2015	GAU	CIR	EXP	EXP	
			799,70	1600,00	2990,00	3553,10	
			C <sub>0</sub>	0,13	0,15	0,35	0,20
			C	1,31	1,15	1,03	1,15

RP: Resistência a penetração; ARE: Porcentagem de areia; SRTM: Altimetria do produto do SRTM; A<sub>0</sub>: Alcance; C<sub>0</sub>: Efeito Pepita; C: Patamar; EXP: Exponencial; CIR: Circular; ESF: Esférico; GAU: Gaussiano; KG: Krigagem; COKG: Cokrigagem.

Nos parâmetros variográficos (Tabela 2) busca-se verificar principalmente a variância nos dados calculados pela diferença entre o patamar (C) e o efeito pepita (C<sub>0</sub>), esperando que os valores da cokrigagem sejam menores que os encontrados com a aplicação da krigagem ordinária. Os melhores desempenhos das variáveis auxiliares na interpolação foram obtidos nas medições do dia 16/10/15 apenas a RP e a ARE foram mais eficientes e; para o dia 03/12/15 a RP, ARE e SRTM.

Para análise da qualidade das interpolações foram considerados determinantes na avaliação da validação cruzada (Tabela 3) os valores do ASE, RMSS e R<sup>2</sup>.

Tabela 3. Validação cruzada para as interpolações do nível freático

Interpolador	Variável Auxiliar	Medições	KG	COKG		
			-	RP	ARE	SRTM
RMSS	ASE	10/16/2015	1,0645	1,1813	0,9000	1,0406
			0,8838	0,6963	0,9486	0,7791
			0,5195	0,5115	0,4738	0,5177
RMSS	ASE	12/03/2015	1,1009	1,1199	0,9553	1,0711
			0,7442	0,6643	0,7794	0,6824
			0,3268	0,3207	0,2933	0,3133

RMSS: Root-Mean-Square Standardized; ASE: Average Standard Error; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação.

Ao analisar o ASE obtido verifica-se que a maior parte das variáveis auxiliares obteve êxito ao deixá-lo menor que o encontrado com a utilização da krigagem. Para as medições a ARE não teve êxito. O RMSS foi considerado adequado, variando acima ou abaixo do limite ideal. O que pode ter contribuído para aumento do erro em algumas predições ou influenciado na baixa redução do erro. O R<sup>2</sup> mostra melhorias pontuais nas predições, entretanto verifica-se que o modelo de predição apresenta acurácia moderada a baixa, refletindo o grau de dependência entre os valores mensurados e preditos.

A qualidade das interpolações também foi verificada por mapas com o desvio padrão (Standard Error) (Figura 3). Verifica-se que as variáveis auxiliares ARE e SRTM obtiveram os resultados mais consistentes nas interpolações.

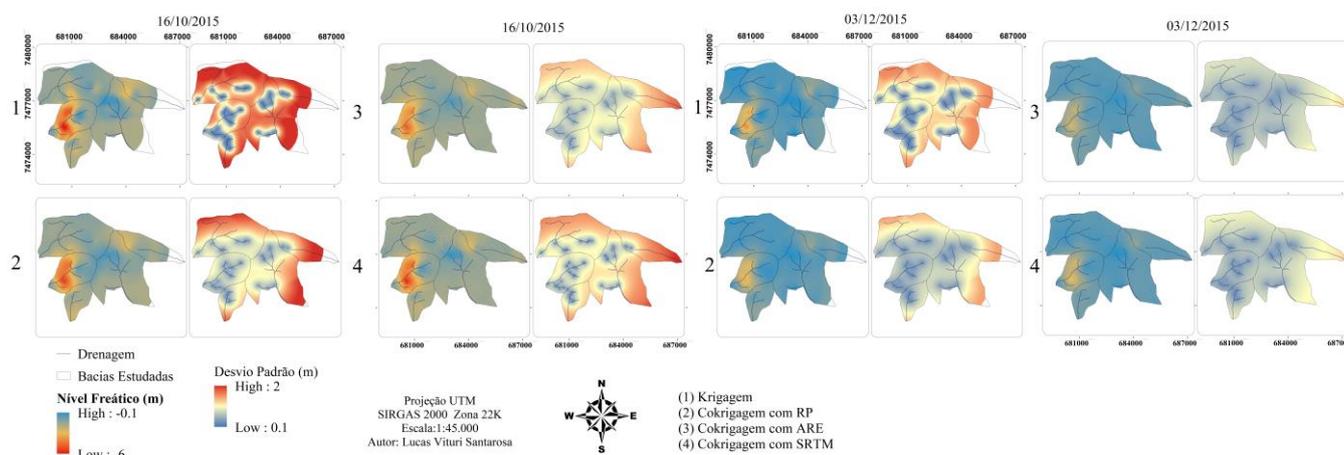


Figura 3. Mapas do nível freático (esquerda) e de desvio padrão (direita) para todas as datas selecionadas e diferentes interpolações. RP: Resistência a penetração; ARE: Porcentagem de areia; SRTM: Altimetria do produto do SRTM

Tabela 4. Análise do desvio padrão em diferentes áreas, área total e área do limite amostral dos poços de monitoramento

Áreas	Variáveis	16/10/2015		03/12/2015	
		Desvio mínimo	Desvio máximo	Desvio mínimo	Desvio máximo
Limite amostral	KG	0,17	1,77	0,19	1,32
	ARE	0,40	1,03	0,32	0,71
	RP	0,21	1,11	0,26	0,86
	SRTM	0,26	1,16	0,28	0,76
Total	KG	0,17	2,07	0,19	1,58
	ARE	0,40	1,76	0,32	1,22
	RP	0,21	1,98	0,26	1,46
	SRTM	0,26	1,95	0,28	1,27

RP: Resistência a penetração; ARE: Porcentagem de areia; SRTM: Altimetria do produto do SRTM

A análise mais detalhada do desvio padrão apresentada nos mapas (Tabela 4) considerando a área total e o limite amostral do monitoramento do nível freáticos, mostra que a ARE teve piores resultados nas análises anteriores devido maior erro mínimo na região do limite amostral, mas o erro máximo é menor que o encontrado com a utilização RP e SRTM. A ARE pode ter apresentado estes resultados devido ao ajuste do modelo, revelando que a variação do método de determinação da granulometria do solo ou a distribuição amostral devem alterados em novos estudos. A RP e SRTM apresentaram alternância com os melhores resultados.

## CONCLUSÕES

O uso de diferentes propriedades físico-hídricas do solo e do relevo obteve bons resultados, com destaque para RP e SRTM como variáveis secundárias para interpolação dos níveis freáticos. Sendo que a ARE obteve bons resultados gerais, mas com grande influência de desvios nos valores mínimos do erro padrão, provavelmente influenciado pelo ajuste do modelo. O uso da cokrigagem como interpolador mostrou-se superior se comparado com os resultados obtidos pela krigagem, verificados a partir dos parâmetros variográficos, na validação cruzada e nos mapas de desvio padrão.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao grupo de estudos LABH2O, o Instituto Florestal do Estado de São Paulo (IF) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo suporte financeiro (processo 2014/04524-7) e pela bolsa de mestrado (processo 2015/05171-3) concedidos para execução dessa pesquisa.

## REFERENCIAS

- AHMAD S.H., SEDGHAMIZ A., Application and evaluation of kriging and cokriging methods on groundwater depth mapping. **Environmental monitoring and assessment**, v. 138, n. 1–3, p. 357–68, 2008.
- DESBARATS A.J. et al, On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model. **Journal of Hydrology**, v. 255, n. 1–4, p. 25–38, 2 Jan 2002.
- HOOSHMAND A., DELGHANDI M., IZADI A., AALI K.A., Application of kriging and cokriging in spatial estimation of groundwater quality parameters. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, n. 14, p. 3402–3408, 2011.
- JOHNSTON K., KRIVORUCHKO K., LUCAS N., VER HOEF J.M., **Using ArcGIS geostatistical analyst**. Esri Redlands, 2001.
- KAMBHAMMETTU B.V.N.P., ALLENA P., KING J.P., Application and evaluation of universal kriging for optimal contouring of groundwater levels. **Journal of Earth System Science**, v. 120, n. 3, p. 413, 1 Jun 2011.
- KITANIDIS P.K., **Introduction to geostatistics: applications to hydrogeology**. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 1997.
- KNOTTERS M., BIERKENS M.F., Predicting water table depths in space and time using a regionalised time series model. **Geoderma**, v. 103, n. 1, p. 51–77, 2001.
- KRESIC N., MIKSZEWSKI A., **Hydrogeological conceptual site models: data analysis and visualization**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.
- MANZIONE R.L., KNOTTERS M., HEUVELINK G.M.B., Incorporation of ancillary information derived from satellite images applied on environmental variables evaluation, In: **Brazilian Symposium on Remote Sensing**. 13, 2007. Florianópolis, Proceedings... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3437-3444. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/attachment.cgi/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.22.15/doc/3437-3444.pdf>> Acessado em: 15 Jan 2016
- MANZIONE R.L., MARCUZZO F.F.N., WENDLAND E.C., Integração de modelos espaciais e temporais para predições de níveis freáticos extremos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1368–1375, 2012.
- PETERSON T.J., CHENG X., WESTERN A.W., SIRIWARDENA L., WEALANDS S.R., Novel indicator geostatistics for water table mapping that incorporate elevation, land use, stream network and physical constraints to provide probabilistic estimation of heads and fluxes. **19th International Congress on Modelling and Simulation**: Perth, Australia. Anais...2011. Disponível em: <<http://www.mssanz.org.au.previewdns.com/modsim2011/I9/peterson.pdf>> Acesso em: 11 nov. 2015
- ROCHA M.M. YAMAMOTO J.K., DA NÓBREGA FONTELES H.R., Cokrigagem Ordinária versus Krigagem com Deriva Externa: Aplicações para a Avaliação do Nível Potenciométrico em um Aquífero Livre. **Geologia USP. Série Científica**, v. 9, n. 1, p. 73–84, 2009.
- SANTAROSA, L. V.; MANZIONE, R. L.. Soil variables as auxiliary information in spatial prediction of shallow water table levels for estimating recovered water volume. **Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 23, Accept Article, 2018.
- SOARES A., **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. 2ª ed. Lisboa: IST Press, 2006.
- YAMAMOTO J.K., LANDIM P.M.B., **Geoestatística: conceitos e aplicações**. [s.l.] Oficina de Textos, 2015.