

XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

MODELAGEM DA OSCILAÇÃO DO NÍVEL FREÁTICO PARA MENSURAR O VOLUME EXPLORÁVEL DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Lucas Vituri Santarosa¹; Rodrigo Lilla Manzione²; Vitor Fidelis Monteiro Gonçalves¹

Resumo:

A modelagem dos recursos hídricos subterrâneos permite o levantamento de dados fundamentais para sua gestão. O uso da geoestatística representa uma ferramenta poderosa para modelagem espaço-temporal de fenômenos naturais auxiliando no entendimento de suas dinâmicas. Este trabalho utilizou a geoestatística aplicada na espacialização da oscilação temporal do nível freático para compreensão da dinâmica do Sistema Aquífero Bauru (SAB) nos domínios da Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB), município de Águas de Santa Bárbara/SP. Os resultados mostraram a capacidade do uso da geoestatística para fornecer dados espaciais do nível freático para estimar o volume de água explorável, os dados apresentados mostram que a captação de 40% do volume recuperado é capaz de abastecer uma população de 30.000 habitantes por quase dois meses. Revelando que áreas como a EEcSB podem ser utilizadas como estoque de águas subterrâneas de curto prazo.

Abstract:

The modeling of groundwater resources allow raising fundamental data for its management. The geostatistics is a one powerful tool for spatiotemporal modeling assisting natural phenomena understand of its dynamics. This study used geostatistics applied to the spatial temporal fluctuation of the groundwater level to understand of dynamics of Bauru Aquifer System (BAS) in the Ecological Station of Santa Barbara (EEcSB) domain, located in Águas de Santa Barbara, São Paulo, Brazil. The results showed the use of geostatistics capacity to provide spatial data of the water table to estimate the volume of exploitable water, the data show that the capture of 40% of the recovered volume is able to supplies a population of 30,000 people for almost two months. Revealing areas such as EEcSB may be used as stock short-term groundwater.

Palavras Chave: geoestatística; águas subterrâneas; recarga de aquíferos

¹ Programa de Pós Graduação em Agronomia (Irrigação e Drenagem), Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – UNESP, Faculdade de Ciências Agrônomicas – FCA, Campus de Botucatu - lucaviturisantarosa@gmail.com; vitorfmg3@gmail.com

² Professor Assistente Doutor, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Campus de Ourinhos, manzione@ourinhos.unesp.br

1. INTRODUÇÃO

A importância vital dos recursos hídricos impõe a necessidade crescente de elaboração e aplicação de modelos capazes de descrever suas dinâmicas e fornecer dados fundamentais para sua gestão. Fato que se acentua quando se trata dos recursos hídricos em ambientes subterrâneos, considerados estoques estratégicos fundamentais para atender a demanda imposta pela sociedade e para manter muitas funções ecológicas.

A complexidade de fatores naturais e antropogênicos que governam e interferem na movimentações e nos estoques das águas subterrâneas devem ser melhor entendidos. Para isso, é fundamental a formação de modelos hidrológicos capazes de reunir informações que descrevam o comportamento dos aquíferos, como descrever as variações nos níveis, a direção e velocidade do fluxo, a origem da água, volume disponível, entre outros. (ANDERSON; WOESSNER, 1992; KREŠIĆ; MIKSZEWSKI, 2013).

O modelos geoestatísticos, apesar da complexos e rigorosos metodologicamente, vem sendo amplamente utilizados pela capacidade de predizer uma variável com precisão e computando as incertezas envolvidas (KITANIDIS, 1997; YAMAMOTO; LANDIM, 2015).

A utilização da geoestatística permite a modelagem da dispersão espacial e espaço-temporal das grandezas que definem a quantidade e a qualidade de recursos naturais (SOARES, 2006). É um instrumento importante para o monitoramento dos aquíferos, reduzindo os efeitos relacionados à coleta de dados (KITANIDIS, 1997) (custos, tempo, barreiras naturais, etc.) e proporcionando análises espaciais e temporais com sentido físico.

Este estudo utilizou a análise espacial, com uso do método geoestatístico, para espacializar dados da oscilação do nível freático capazes fornecer informações sobre dinâmica do Sistema Aquífero Bauru (SAB) no ano hidrológico de 2014/2015. Levantamentos como este podem auxiliar no planejamento e gestão das águas subterrâneas, permitindo a espacialização de dados temporais que possibilitem a estimativa do volume de água disponível para ser utilizada em momentos de escassez hídrica, como a que ocorreu no ano hidrológico de 2013/2014.

2. OBJETIVOS

Utilizar dados do monitoramento da oscilação do nível freático para determinação do volume explorável de água em uma área do Sistema Aquífero Bauru (SAB) nos domínios da Estação Ecológica de Santa Barbara (EEcSB), localizada no Município de Águas de Santa Barbara – São Paulo.

Especificamente, buscou-se:

- a) Estimar o volume de água armazenado no subsolo com a utilização da interpolação dos níveis freáticos em diferentes datas de medição fazendo o uso da geoestatística
- b) Avaliar uso de áreas de preservação ambiental como estoques de curto prazo para captação de água utilizada para abastecimento público.

3. MATERIAL

Foram utilizadas as medições do nível freático de 32 poços de monitoramento dispostos na Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB) (Figura 1). A EEcSB está localizada à Rodovia SP 26 – km 58, latitude 24°48' S e longitude 49°13' O, no município de Águas de Santa Bárbara – SP, sobre o Sistema Aquífero Bauru (SAB), aquífero sedimentar de extensão regional formado por arenitos do período cretáceo superior, apresenta superfície aflorante por mais de 96 mil km², representando uma importante fonte de água para 240 municípios do Estado de São Paulo.

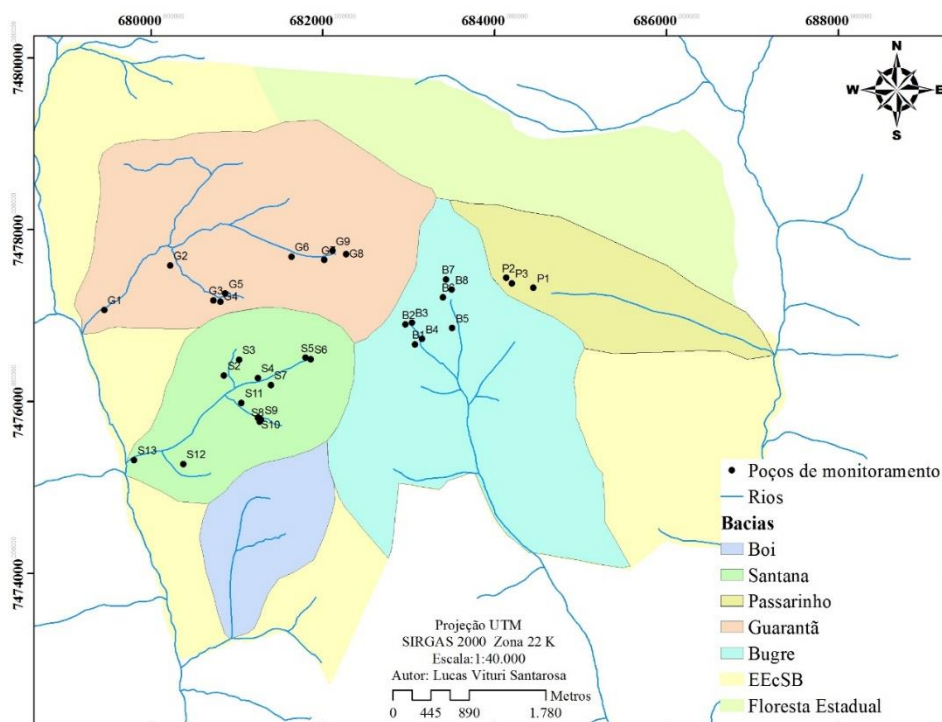
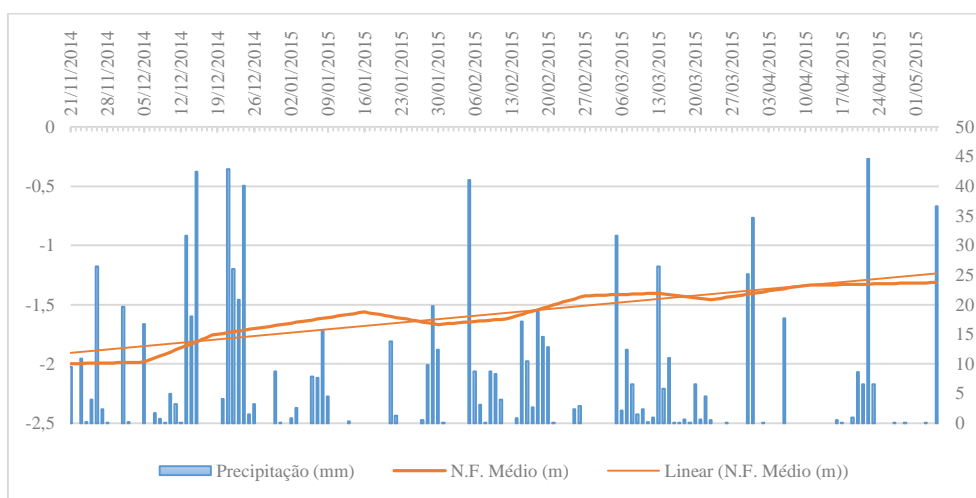


Figura 1 - Mapa de localização do poços de monitoramento

Foram utilizadas as medições realizadas nos dias 21 de novembro de 2014 e 05 de maio de 2015 que representam período de elevação do nível freático após a escassez do ano hidrológico 2013/2014.

Gráfico 1 - Nível Freático (NF) e precipitação na EEcSB do período de 21 de novembro de 2014 a 05 de maio de 2015



A EEcSB encontra-se localizada na Bacia Sedimentar do Paraná (morfeestrutura) e no Planalto Ocidental Paulista (morfoescultura), apresenta relevo predominante de colinas amplas e baixas com altimetria em torno de 300 a 600 metros e declividade variando entre 10 a 20% (ROSS; MOROZ, 1996). As formações rochosas na região são os arenitos da Formação Adamantina e Marília pertencentes ao Grupo Bauru, com preponderância da formação Adamantina (MELO; DURIGAN, 2011). O solo predominante na EEcSB é o Latossolos Vermelhos Eutroféricos e Distroféricos (LV56) (OLIVEIRA et al., 1999). O clima característico é quente de inverno seco, com temperatura 16°C mês mais frio e 23°C mês mais quente (Cwa) favorecendo a ocorrência da vegetação savânica, popularmente conhecida como cerrado, que compete com grande áreas de Pinus utilizados no reflorestamento local antes da criação da EEcSB.

Toda a área faz parte da unidade hidrográfica do Pardo, integrante da bacia hidrográfica do Rio Paranapanema, Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Paranapanema (UGRHI-17). Os maiores corpos de água em contato com a Estação Ecológica são o rio Capivari e o rio Capão Rico (HONDA; NIZOLI, 2005). Ambos os rios nascem fora da Unidade de Conservação e a margeiam, sendo que o rio Capivari é o limite a oeste e o rio Capão Rico a leste. Dentro da EEcSB e da Floresta Estadual encontram-se os principais rios contribuintes do Capão Rico e do Capivari, são eles: Divisa, Guarantã, Santana, Boi, Lavapé, Passarinho e Bugre.

4. MÉTODOS

A análise exploratória exigida pelo método geoestatístico e a interpolação dos dados foram realizados no pacote *Geostatistical Analyst* do Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGIS segundo Johnston et al. (2001).

O formalismo para aplicação da geoestatística para Kitanidis (1997) deve seguir três etapas. (1) análise exploratória; (2) estimativa de parâmetros e (3) validação do modelo.

A análise exploratória visa realizar cálculos estatísticos capazes de descrever características do conjunto amostral. A estimativa de parâmetros refere-se ao ajuste do modelo teórico do variograma experimental em relação a correlação espacial da variável e a validação cruzada testa a eficiência do modelo. Neste é retirada cada um dos valores mensurados e em seguida é feita a predição do valor a partir dos valores próximos, avaliando a relação dos valores mensurados e dos valores preditos por medidas estatísticas.

Na validação cruzada no ArcGIS uma boa estimativa deve apresentar média padronizada (MS - *Mean Standardized*) próxima de zero, o menor valor médio quadrático (RMS - *Root-Mean-Square*) possível, a média do desvio padrão (ASE - *Average Standard Error*) próxima da média padronizada e o valor médio quadrático padronizado (RMSS - *Root-Mean-Square Standardized*) próximo de 1 (JOHNSTON et al., 2001)

Foram consideradas determinantes para verificar a qualidade da interpolação do nível freático o desvio padrão médio (ASE), o valor médio quadrático padronizado (RMSS) e o coeficiente de determinação (r^2).

O interpolador utilizado foi a cokrigagem, uma extensão multivariada do método da krigagem, permitindo a estimativa de variáveis regionalizadas em conjunto, com base na correlação espacial entre duas variáveis. O uso cokrigagem tem o objetivo de melhorar predições locais levando em conta informações adicionais trazidas por uma variável diferente da que se deseja prever, é importante que a variável secundária seja mais densamente amostrada e apresente melhor autocorrelação (AHMAD; SEDGHAMIZ, 2008; YAMAMOTO; LANDIM, 2015).

Como os dados dos poços são escassos, foram utilizados os valores de altimetria retirados das cartas topográficas do IBGE para auxiliar na interpolação do nível freático. Interpolações que integram diferentes fontes de informação vem sendo utilizadas para auxiliar as estimativas de variáveis amostradas em menor densidade ou integrar diferentes planos de informação, o objetivo é fazer a variável adicional acrescentar algum ganho de informação na estimativa da variável de interesse (DESBARATS et al., 2002; MANZIONE et al., 2007; MCBRATNEY et al., 2003; PETERSON et al., 2011).

O cálculo do volume recuperado foi realizada pela álgebra de mapas no SIG com base os mapas resultantes da interpolação do nível freático. O cálculo foi estruturado a partir de duas datas do nível da flutuação do nível freáticos do dia 21 de novembro de 2014, nível mais baixo monitorado, até 05 de maio de 2015, primeiro pico de elevação do nível freático após o período das chuvas.

Para isso foi utilizada a seguinte equação:

$$VR = (NF_f - NF_i) \times P \times \eta_e \quad (1)$$

Onde, o volume de recarga (VR) de cada recuperação é calculado pela variação do nível freático em metros obtido pela diferença do nível inicial e final ($NF_f - NF_i$) no período, multiplicado pelo valor da área de cada pixel em metros quadrados (P) e pelo valor de porosidade efetiva (η_e).

O valor de porosidade utilizado foi de 10% que se aproxima do valor médio para o SAB (entre 5% e 15%) e do limite inferior da porosidade efetiva para solos Quartzarênicos com variação entre 12 e 18%. Este valor utilizado é uma generalização, considerando a camada de solo e de rocha. Como não existem medições precisas sobre as características físico-hídricas e as espessuras das camadas de solo e rocha, o valor da porosidade efetiva não pode ser tão baixo para simular apenas a condição da rocha e nem tão elevado que simule apenas a condição de porosidade efetiva do solo.

5. RESULTADOS

5.1. Interpolação do nível freático

Seguindo o formalismo geoestatístico para realização da interpolação do nível freático foram calculados os variogramas (Figuras 2 e 3) e os parâmetros variográficos (Tabela 1) e realizada a validação cruzada (Tabela 2).

Os variogramas revelam que o comportamento da variância foi adequado com efeito pepita próximo de zero, demonstrando boa correlação espacial entre os dados. Nota-se que após 2.000 metros o comportamento da variância se distancia do modelo ajustado. Isto é causado pela sensível perda de correlação espacial, causada provavelmente pela característica do conjunto amostral.

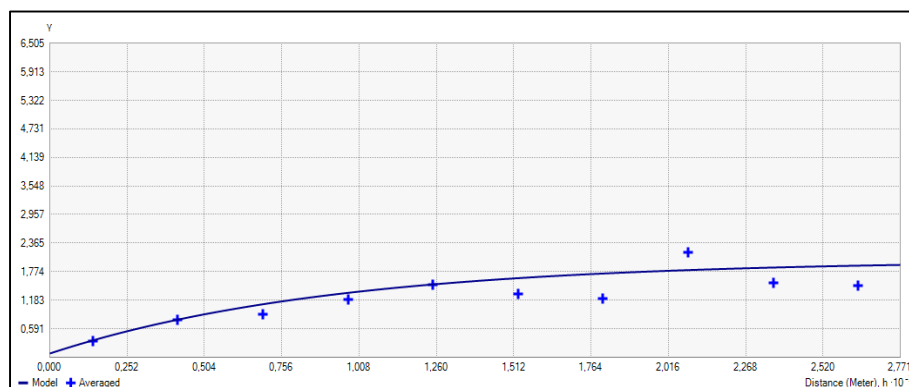


Figura 2 - Variograma para a medição do dia 21/11/2014

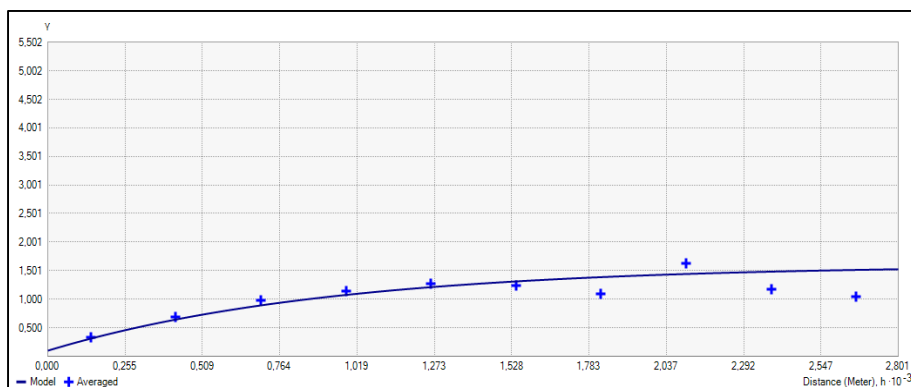


Figura 3 - Variograma para a medição do dia 05/05/15

A Tabela 1 mostra numericamente o comportamento do variograma.

Tabela 1 -Parâmetros variográficos

Medição do Nível Freático	Modelo	A ₀ (m)	C ₀	C	Lags
21/11/2014	Exponencial	2.771,4	0,08	1,92	10
05/05/2015	Exponencial	2.779,4	0,1	1,54	10

A₀: Alcance; C₀: Efeito Pepita; C: Patamar

Na Tabela 2 destaca-se os valores de RMSS que satisfaz as exigências para de uma boa interpolação. Um ASE em torno de 0,7 m, um desvio padrão aceitável se considerarmos a extensão da área e a densidade amostral dos poços de monitoramento. Outro dado a ser destacado é o coeficiente de determinação (r^2) com valor moderado, indicando a capacidade de predição do modelo ao mensurar o grau de dependência entre os valores mensurado e preditos no processo de validação cruzada.

Tabela 2 - Validação Cruzada

Medição do Nível Freático	RMS	MS	RMSS	ASE	r^2
21/11/2014	0,6482	-0,0218	0,9404	0,7015	0,67
05/05/2015	0,7882	-0,0207	1,0899	0,6768	0,42

MS: média padronizada (Mean Standardized); RMSS: valor médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized); ASE desvio padrão médio (Average Standard Error); RMS: valor médio quadrático (Root-Mean-Square); r^2 : coeficiente de determinação.

5.2. Volume de recarga

Nas Figuras 4 e 5 verifica-se a oscilação do nível que foram interpoladas, destaca-se dois momentos de do nível freático, 21 de novembro de 2014, nível mais baixo, e 05 de maio de 2015, primeiro pico do nível freático após as chuvas do período úmido.

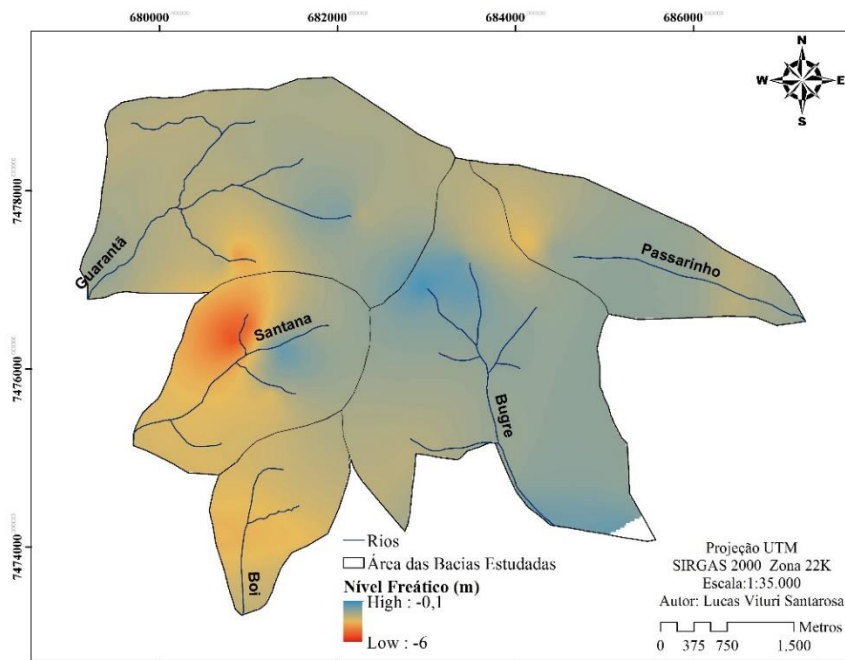


Figura 4- Mapa do nível freático no dia 21/11/2014

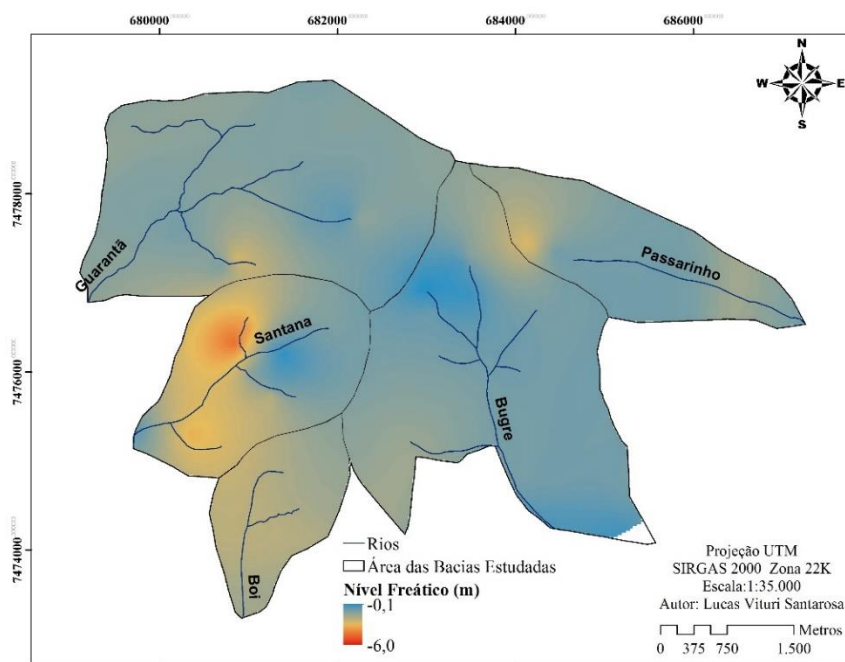


Figura 5 - Mapa do nível freático no dia 05/5/2015

O valor do volume armazenado no subsolo no período foi de 1.491.271m³ (ou 1.491.271.000 litros). O valor acumulado total de precipitação responsável pelas retomadas do nível foi de 890 mm, este valor convertido em volume em relação a área das bacias estudadas (2.549 hectares) representa um volume precipitado de 22.681.604 m³ (ou 22.681.604.000) litros. O valor recuperado equivale a 10% da chuva incidente e representa uma recarga de 58 mm. A Tabela 3 resume estas informações.

Tabela 3 – Valores do volume de precipitação armazenados no aquífero no período úmido entre novembro de 2014 e maio de 2015

Precipitação (mm)	890
Área (m²)	25.485.000
Volume precipitado (litros)	22.681.604.000
Volume recuperado (litros)	1.491.271.000
Relação entre o volume precipitado e o recuperado	7%
Recarga em (mm)	58

Considerando que seja possível captar 40% desse volume recuperado na área das Bacias da EECSB estudadas e o consumo médio nos municípios de Águas de Santa Barbara, Manduri e Cerqueira Cesar. Este volume seria capaz de suprir o abastecimento para população dos municípios por quase 2 meses, considerando ainda uma perda de 20% no sistema de captação e distribuição de água (Tabela 4).

Tabela 4 – Estimativa do uso do volume água estocado no aquífero para abastecimento dos municípios próximos a EECSB.

Municípios	Águas de Santa Barbara	Manduri	Cerqueira Cesar	Total
Consumo médio per capita (litros/dia)	201	277	222	-
População (habitantes)	5.600	8900	17.530	32.030
Consumo mensal (litros)	33.768.000	73.959.000	116.750.000	224.477.000
Volume captado (litros) – 40%	477.206.720			
Meses supridos pelos volumes de água subterrânea captados	1,7			

Com os cálculos realizados justifica-se a importância de aquíferos do tipo livre utilizado como meio natural de estoque e disponibilização das águas. Uma fonte de abastecimento estratégicos de curto prazo, uma vez que as oscilações nos níveis são de escala mensal. O SAB apresenta grande potencialidade para este fim, reforçando a necessidade da introdução de uma gestão eficiente, capaz levantar as potencialidades regionais, descrever dinâmicas e mensurar os volumes disponíveis.

Para isso é fundamental a implementação de práticas conservacionistas, tal qual a criação de áreas de preservação como a EECSB com a capacidade de captar, filtrar e disponibilizar volumes de água para suprir as demandas dos municípios em períodos críticos como a estiagem de 2014.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- O estudo apresentou uma aplicação bem sucedida do uso da geoestatística para o planejamento e gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

- O uso de uma variável secundária na interpolação do nível freático permite superar os limites na coleta de dados para o monitoramento das águas subterrâneas, que demandam grandes investimentos.
- O estudo demonstrou que o monitoramento das águas subterrâneas possibilita o conhecimento do comportamento do aquífero, que, espacializado, permite a estimativa do volume de água disponível capaz de ser utilizado em períodos de escassez.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao grupo de estudos LABH2O e os envolvidos na coleta de dados em campo 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).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport**. San Diego: Academic Press, 1992.
- 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.
- HONDA, E. A.; NIZOLI, E. C. Caracterização das águas da Estação Ecológica de Águas De Santa Bárbara. Relatório Técnico, Instituto Florestal, 2005. 41 p.
- JOHNSTON, K. et al. **Using ArcGIS geostatistical analyst**. [s.l.] Esri Redlands, 2001. v. 380
- KITANIDIS, P. K. **Introduction to geostatistics: applications to hydrogeology**. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 1997.
- KREŠIĆ, N.; MIKSZEWSKI, A. **Hydrogeological conceptual site models: data analysis and visualization**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.
- MANZIONE, R. L.; KNOTTERS, M.; HEUVELINK, G. B. Incorporation of ancillary information derived from satellite images applied on environmental variables evaluation. **Anais do XIII Simpósio de Sensoriamento Remoto**, p. 3437 – 3444, abr. 2007.
- MCBRATNEY, A. .; MENDONÇA SANTOS, M. .; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, n. 1-2, p. 3–52, nov. 2003.
- MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. Plano de manejo da Estação Ecológica de Santa Bárbara. São Paulo: Instituto Florestal, 2011. 222p.
- OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M, N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. Mapa Pedológico do Estado de São Paulo, 1:500.000. Campinas: FAPESP; 1999.

OLIVEIRA, J.B.; Solos do estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Bol. Ci., n. 45, Campinas/SP: IAC. 1999. 63p.

PETERSON, T. J. et al. **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

ROSS, J.L.S. e MOROZ, I.C. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. Revista do Departamento de Geografia, São Paulo, n.10, 1996: 41-56

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. 2^a. ed. Lisboa: IST Press, 2006.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. [s.l.] Oficina de Textos, 2015.