

# MONITORAMENTO DO LENÇOL FREÁTICO NA BACIA DO CÓRREGO BOTAFOGO – GOIÂNIA/GO

*Monitoring the water table in the Botafogo watershed - Goiânia/GO*

Recebido: 26/03/2018

Revisado: 18/07/2018

Aceito: 13/11/2018

Vanessa Romero  
Klebber T. M. Formiga  
Diego de Sousa Romero

## RESUMO

A geostatística representa uma ferramenta para sistematizar dados, envolvendo análise e inferência de fenômenos espaciais e/ou temporais levando-se em consideração a localização geográfica e a dependência espacial de variáveis. Neste estudo, a técnica geostatística de krigagem foi empregada para interpolar os níveis de água subterrânea em locais não amostrados levando em consideração as características hidrogeológicas, climatológicas e de vegetação da área. As cotas altimétricas foram obtidas em programa SIG através de dados do projeto SRTM. A coleta dos dados de nível de água subterrânea da rede de monitoramento foi realizada através do medidor de nível Water Tape, mensalmente e contemplou períodos de seca e de chuva, entre maio/2016 e junho/2017. O mês de setembro de 2016 foi o que representou maior número de poços secos (9). Ao passo que nível d'água do PM - J rebaixou em média 0,63 m comparando-se os meses secos maio e junho de 2016 e o mesmo bimestre de 2017. Comparando-se os resultados do período seco contemplado em 2016 e 2017 por este estudo, notou-se maior flutuação do nível de água subterrânea na bacia do córrego Botafogo em maio de 2016 e maio de 2017.

**Palavras-chave:** geostatística, águas subterrâneas, carga hidráulica.

## ABSTRACT

Geostatistics represents a tool to systematize data, involving analysis and inference of spatial and / or temporal phenomena taking into account the geographic location and the spatial dependence of variables. In this study, the geostatistical technique of kriging was used to interpolate groundwater levels in non-sampled sites taking into account the hydrogeological, climatological and vegetation characteristics of the area. The altimetric dimensions were obtained in GIS program through SRTM project data. The data collection of the groundwater level of the monitoring network was carried out through the Water Tape level meter monthly and included periods of drought and rainfall between May 2016 and June 2017. The month of September 2016 represented the largest number of dry wells (9). While the water level of the PM - J lowered by an average of 0.63 m compared to the dry months of May and June of 2016 and the same two months of 2017. Comparing the results of the dry period contemplated in 2016 and 2017 by this study, we noticed a greater fluctuation of groundwater level in the Botafogo stream basin in May 2016 and May 2017.

**Keywords:** geostatistics, groundwater, hydraulic head.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos sistemas de água subterrânea os efeitos de estresses hidrológicos são detectados através da medição periódica do nível da água nos poços de monitoramento possibilitando estimar tendências através de geostatística, por interpolação e modelagem (ALLEY; TAYLOR, 2001). Técnicas de geoprocessamento são empregadas em estudos hidrogeológicos através do tratamento geostatístico dos dados espaciais no

intuito de avaliar o comportamento das variações dos níveis de água subterrânea ao longo dos anos (DESBARATS et al., 2002; KUMAR et al., 2005; NIKROO et al. 2010; BERVEGLIERI et al., 2011), por meio de funções locais, baseadas na krigagem, na triangulação e no inverso do quadrado da distância (AHMADI; SEDGHAMIZ, 2008).

No âmbito de gestão dos recursos hídricos, a krigagem auxilia na estimativa do número ideal de poços que podem ser adicionados a uma rede de monitoramento sem ocasionar o rebaixamento do lençol freático (PRAKASH; SINGH, 2000).

Corroborando a aplicabilidade da geoestatística no monitoramento dos níveis de água subterrânea, Ahmadi e Sedghamiz (2008) empregaram a validação cruzada, removendo temporariamente do conjunto de dados amostrais um valor observado, reestimando-o a partir dos outros, mantendo o variograma mais apropriado, com variância mínima de erro de estimativa por procedimento de tentativa e erro. Os autores propuseram a utilização da krigagem ordinária e universal para análise espacial e temporal do nível das águas subterrâneas de 4670 poços agrícolas instalados, saturados e ativos na planície Darab, no sudeste da província de Fars, no sul do Irã.

Nesse sentido, métodos de interpolação por krigagem e cokrigagem foram empregados por Kumar et al. (2005) visando mensurar os efeitos da irrigação no nível das águas subterrâneas na região noroeste de Punjab, na Índia, situada entre os rios Ravi e Beas.

Segundo os autores, estudos sobre o comportamento das águas subterrâneas para o período de junho de 1979 a junho de 1999 revelaram que o lençol freático rebaixou em 93% da área considerada (49% até 3 m, 37% entre 3 e 5 m e 7% entre 5 e 10 m), e nos 7% restantes, aumentou até 3 m.

No estudo de um aquífero não confinado, heterogêneo, composto de camadas sedimentares, com transmissividade variando entre 8 e 4500 m<sup>2</sup>/dia e coeficiente de armazenamento médio utilizado equivalente a 0,07, o nível da água subterrânea foi monitorado mensalmente em 39 poços piezométricos de 1993 a 2004 distribuídos na planície Darab, no sudeste da província de Fars, no sul do Irã, no intuito de representar as flutuações do nível de água subterrânea de toda a área de planície (AHMADI; SEDGHAMIZ, 2007).

De um total de 4403 poços agrícolas legais e 767 ilegais, com descarga anual média de 635×106 m<sup>3</sup> e 110×106 m<sup>3</sup>, respectivamente, cerca de 500 poços agrícolas encontravam-se secos, devido a severas secas nos últimos anos do período de análise. A precipitação na área de estudo corresponde a 277 mm de precipitação,

dos quais 65% são utilizados na evapotranspiração, 23% infiltram-se no solo e 12% são convertidos em escoamento. Com base nos dados de 16 anos (1990-2005), o balanço hídrico da planície foi cerca de -350×106 m<sup>3</sup>, o que significa que as demandas anuais de água são quase duas vezes maior do que a correspondente recarga, resultando em uma diminuição significativa nas reservas de água subterrânea (AHMADI; SEDGHAMIZ, 2007).

O rebaixamento sistemático do lençol freático pode ser ocasionado pela exploração intensiva das águas subterrâneas, interferindo não somente no balanço hídrico de determinada região, mas também no ecossistema local colocando em risco populações cujo abastecimento é dependente das águas subterrâneas (MANZIONE et al., 2010).

Neste estudo, a geoestatística foi empregada na análise das variações espaciais e temporais das flutuações das águas subterrâneas na bacia do córrego Botafogo, em Goiânia, Goiás, através de interpolação, por krigagem, dos níveis de água subterrânea em locais não amostrados, levando em consideração a distribuição espacial das cargas.

## **2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DA BACIA**

### **LOCALIZAÇÃO, HIDROGRAFIA, DECLIVIDADE, VEGETAÇÃO, ALTIMETRIA, USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BOTAFOGO**

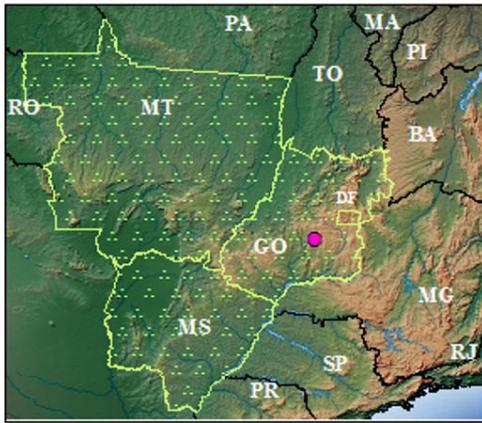
A bacia hidrográfica do Córrego Botafogo é sub-bacia do Ribeirão Anicuns, localiza-se na região centro-oeste do Brasil, Estado de Goiás, abrangendo os municípios de Goiânia e Aparecida de Goiânia (Figura 01).

O córrego Botafogo é o principal corpo hídrico da bacia, com extensão aproximada de 11,3 km e possui três sub- afluentes: o córrego Sumidouro, o córrego Areião e Capim-Puba (Figura 01).

As características do relevo da bacia indicam predominância de declividades inferiores a 7% em uma área de aproximadamente 30,88 km<sup>2</sup> (ROMERO et al., 2017).

A predominância de declividades inferiores a 7% contribui na recarga do aquífero, favorecendo a

## Localização da Bacia Hidrográfica do Córrego Botafogo



- Região Centro Oeste do Brasil
- Bacia Hidrográfica do Córrego Botafogo

Mapa: Vanessa Romero  
 Fonte: SIEG e IBGE  
 Projeção UTM - Fuso 22 S  
 Datum Horizontal: SIRGAS 2000



- Bacia Hidrográfica do Córrego Botafogo
- Bacia Hidrográfica do Ribeirão Anicuns
- Limite Municipal
- Perímetro Urbano
- Hidrografia



0 10.000 20.000  
 Escala - 1:350.000

Figura 01 – Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Córrego Botafogo.

Fonte: Elaborado pelos autores com dados próprios.

infiltração e o armazenamento das águas das chuvas (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 2016).

Conforme dados censitários do IBGE, estima-se que a cidade de Goiânia possuía, em 2016, em média 1.448.639 habitantes, dos quais cerca de 70% vivem nos limites da bacia do ribeirão Anicuns (GOIÂNIA, 2008).

A importância da área de pesquisa é evidente quando consideramos que mais de 911.400 pessoas habitam a região, convivendo, contribuindo e suportando os problemas socioambientais ali desenvolvidos.

O cerrado, vegetação típica de regiões com estações climáticas seca e chuvosa, é o bioma dominante em Goiás, com pequena porção ao sudeste do estado inserida na Mata Atlântica (ROMERO et al., 2017) e amplitude altimétrica de 690 a 892 metros (Figura 02).

A área de estudo encontra-se consideravelmente antropizada vide uso e ocupação inadequados da zona de amortecimento da bacia que se encontra urbanizada,

com 174 poços tubulares devidamente cadastrados e/ou outorgados (Figura 02).

Pequena porção ao norte da bacia caracteriza-se pela prática da agricultura. Na área de abrangência da bacia encontram-se pequenas porções de vegetação remanescente, de forma dispersa (ROMERO et al., 2017).

No estado de Goiás atuam, de acordo com a classificação climática de Köppen, o clima tropical com estação seca no inverno (Aw), o clima temperado úmido com inverno seco e verão quente (Cwa) e o clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado (Cwb), conferindo à região a predominância de dois períodos no ano: seco e chuvoso (Aw). De modo que, o clima na capital Goiânia é o tropical semiúmido, com período seco no outono e inverno (maio a setembro) e período chuvoso na primavera e verão (outubro a abril) (ROMERO et al., 2017).

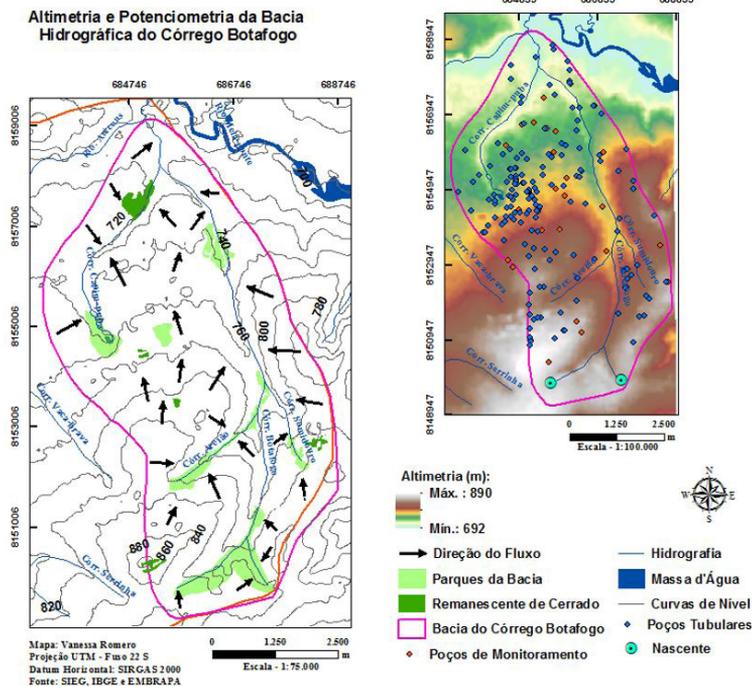


Figura 02 – Mapa Potenciométrico e Altimétrico da Bacia Hidrográfica do Córrego Botafogo.  
 Fonte: Elaborado pelos autores.

### GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA, SISTEMA AQUÍFERO, HIDROGRAFIA E SOLOS DA BACIA DO CÓRREGO BOTAFOGO

Os fatores geológicos, morfológicos, climatológicos, hidrológicos e pedológicos, em conjunto com a vegetação, determinam a ocorrência de água subterrânea, bem como seu movimento e qualidade. No contexto geológico regional a área em estudo encontra-se na Faixa Brasília (UHLEIN et al., 2012), pertencente ao Grupo Araxá, Unidade B (SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE GÓIAS, 2006).

A bacia do Botafogo caracteriza-se, em maior área, por rochas do Grupo Araxá e depósitos aluvionares holocênicos. Pequena porção ao norte da bacia é recoberta por areia, argila e cascalho (SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE GÓIAS, 2006).

A maior parte do estado de Goiás encontra-se sobre rochas cristalinas, refletindo diretamente no potencial hidrogeológico, onde grande parte dos aquíferos

apresenta porosidade do tipo fissural, porém, existem no estado, aquíferos porosos, cársticos e fissuro-cársticos (SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE GÓIAS, 2006).

Segundo estudo sobre as unidades aquíferas do município de Goiânia (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 2016), o Grupo Araxá contempla dois aquíferos distintos que se caracterizam, pela respectiva litologia, como poroso, onde existem quartzitos e quartzitos micáceos (capacidade específica de até 3,5 m<sup>3</sup>/h/m e vazão média dos poços de 16,5 m<sup>3</sup>/h); ou fissural, onde ocorrem os xistos (capacidade específica de até 1,5 m<sup>3</sup>/h/m e vazão média dos poços de 5,1 m<sup>3</sup>/h).

No Complexo Anápolis-Itauçu, ocorre o Aquífero Metassedimentos/Metavulcânicas Indiferenciado, fissural (também denominado Sistema Aquífero Cristalino Sudeste - SACSE) com capacidade específica média de 0,15 m<sup>3</sup>/h/m e vazão média de 4,5 m<sup>3</sup>/h/m (Tabela 01).

Tabela 01 – Parâmetros Hidráulicos dos aquíferos da Bacia do Botafogo

Parâmetros Hidráulicos	SACSE	SAAX	
		Poroso	Fissural
Q (m <sup>3</sup> /h)	4,5 a 6,0	16,5	5,1
Ss (m <sup>3</sup> /h/m)	0,15	3,5	1,5
K (m/s)	8,8 x 10 <sup>-7</sup>	1,9 x 10 <sup>-6</sup>	
T (m/s)	1,3 x 10 <sup>-4</sup>	2,8 x 10 <sup>-4</sup>	
Sy (m <sup>3</sup> /h/m)	0,183	0,587	

Fonte: Secretaria de Indústria e Comércio de Góias (2006) e Serviço Geológico do Brasil (2016).

A geomorfologia é um dos aspectos mais relevantes para estudos hidrológicos, pois permite avaliar como cada unidade geomorfológica influencia as condições de circulação das águas subterrâneas e de potencial de recarga e descarga de aquíferos, conforme o padrão de relevo, hipsometria, densidade de drenagem e tipos de coberturas de regolitos (SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE GÓIAS, 2006).

As áreas mais elevadas favorecem a recarga de aquífero por apresentarem maior gradiente e em geral maior carga hidráulica em aquíferos regionais que favorecem as condições de infiltração e a transferência das águas de precipitação para zonas mais profundas dos aquíferos (SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE GÓIAS, 2006).

Ademais, áreas consideradas de dissecação muito fraca compõem as melhores zonas de recarga e áreas com dissecação muito forte compõem regiões com baixo potencial de recarga (SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE GÓIAS, 2006).

O sistema aquífero da bacia do Botafogo encontra-se fortemente vinculado às Superfícies Regionais de Aplainamento - SRA, que se caracterizam pelo padrão de relevo suave ondulado a plano, cuja estrutura granular dos latossolos, imprime um funcionamento hídrico de alta condutividade hidráulica e elevada porosidade efetiva (não inferior a 8%) (SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE GÓIAS, 2006).

O Latossolo Vermelho Escuro denominado Distrófico (LEd) é o domínio pedológico mapeado de ocorrência significativa na bacia do Botafogo e

se caracteriza por apresentar cor avermelhada, baixa fertilidade e composição férrica proveniente de ataque sulfúrico (GOIÂNIA, 2008).

Este tipo de solo é encontrado em áreas de topografia plana ou suavemente ondulada, como os denominados chapadões do Brasil Central, constituindo uma das principais classes de solos destinadas à agricultura mecanizada (destaque para soja, milho, feijão, café, trigo), juntamente com os Latossolos Roxos e Vermelho-Amarelos (CASSETI, 1992).

## ANÁLISE GEOESTATÍSTICA E MÉTODOS

A metodologia utilizada para sistematizar os dados foi a geoestatística que envolve análise e inferência de fenômenos espaciais e/ou temporais levando-se em consideração a localização geográfica e a dependência espacial de variáveis.

A origem do estudo geoestatístico deu-se em 1951 no campo da mineração, por Daniel C. Krige, que verificou que a distância entre as observações deveria ser levada em consideração na inferência de jazidas de ouro, além da informação da variância dos dados (CAMARGO, 1998).

A Teoria das Variáveis Regionalizadas criada por Matheron (1963) é a base da geoestatística e pressupõe que os valores de uma amostra estão relacionados à sua posição espacial, ou seja, amostras mais próximas tendem a ser mais parecidas do que amostras mais distantes, de modo que cada célula de uma malha tridimensional pode ser calculada por um conjunto de equações à partir da correlação entre os pares observados.

A geoestatística representa um ramo da estatística que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial de variáveis (CAMARGO, 1998). A teoria das variáveis regionalizadas criada por Matheron (1963) é a base da geoestatística e pressupõe que o valor de uma variável pode ser calculado para cada célula de uma malha tridimensional por um conjunto de equações a partir de inferências e predições de uma amostra de dados conhecidos.

Segundo Naghettini e Pinto (2007), a distribuição espaço-temporal da água é regida por fenômenos hidrológicos que definem mecanismos de transporte e armazenamento. Nesse sentido, o uso de técnicas

geoestatísticas tem sido amplamente aplicado em estudos que contemplam os campos de hidrologia e hidrogeologia.

Marcuzzo et al. (2010) utilizaram interpolação matemática por Krigagem e Spline de Tensão com o intuito de verificar qual método é mais adequado na espacialização de pontos com valores de precipitação, concluindo que a Krigagem apresentou melhores resultados na distribuição espacial das chuvas na região metropolitana de Goiânia e seu entorno.

Segundo Yamamoto e Landim (2015) a krigagem ordinária e a cokrigagem são métodos geoestatísticos indicados para avaliações de tendências locais, ao passo que os métodos estocásticos são indicados para análises de tendências globais. Sá (2016) encontrou melhores resultados de simulação por bandas rotativas com a técnica do desagrupamento por célula para o Sistema Aquífero Guarani (SP), e melhores resultados para interpolação dos dados por meio de krigagem ordinária combinada com regressão linear sem a técnica do desagrupamento, para o Sistema Aquífero Bauru (SP).

Os dados de nível das águas subterrâneas foram obtidos de uma rede de monitoramento contemplando 24 poços distribuídos pela bacia do córrego Botafogo. Para a análise estatística dos dados obtidos no período de análise compreendido entre maio/2016 e junho/2017, foi utilizado o software ArcGIS, da ESRI, versão 10.1, que permitiu a espacialização dos dados de nível, tratamentos, avaliação e interpretação de procedimentos estatísticos.

## 2.2 SEMIVARIOGRAMA

O semivariograma (Equação 1) é a ferramenta geoestatística que permite representar quantitativamente a variação espacial de uma variável regionalizada, podendo ser representado com um gráfico  $\gamma(h)$ , cujo vetor  $h$  separa duas amostras (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989; CAMARGO et al., 2004; MARCUZZO et al., 2010):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

Onde:

$\gamma(h)$  é a semivariância para a distância  $h$ ;

$N(h)$  é o número de pares experimentais e

$h$  é a distância que separa dois pontos  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$ .

O ajuste do semivariograma experimental é feito manipulando-se os parâmetros até que um modelo de função atinja o valor no qual ocorre a estabilidade (patamar) no campo aleatório (MARCUIZZO et al., 2012). Embora exista uma infinidade de funções que se ajustem aos semivariogramas fundamentados nas Teorias das Variáveis Regionalizadas Yamamoto e Landim (2015) citam como principais, os esféricos, exponenciais, gaussianos, cúbicos, pentaesféricos, e de efeito furo. O modelo esférico representa o ajuste mais comum em geoestatística e é dado pela equação (2):

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_o + C \left[ 1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{para } h < a \\ \gamma(h) = C_o + C & \text{para } h \geq a \end{cases} \quad (2)$$

Onde:

$a$ , denominado alcance, é a distância a partir da qual não há mais correlação espacial entre as variáveis, e, portanto não há aumento no semivariograma;  $C_o$  é o *nugget* (valor de  $\gamma$  para as distâncias iguais a zero, que indica variações de distâncias muito pequenas devida a erros de medição ou a variações de pequena escala e

$C_o + C$  é chamado de *sill* (patamar) e corresponde ao valor médio da semivariância além da distância  $a$ .

## 2.3 KRIGAGEM

A krigagem pressupõe o conjunto de técnicas geoestatísticas de ajuste utilizada para aproximar dados interdependentes, implicando que a variação espacial de um fenômeno é estatisticamente homogênea em determinada área e pode ser quantificada por um gráfico de dispersão, denominado semivariograma, que mostra a relação entre a semivariância e a distância entre pares de amostras (MARCUIZZO et al., 2012). A técnica consiste em estimar valores médios e também uma medida de acuracidade dessa estimativa (BERVEGLIERI et al., 2011). A divisão da área de estudo em subáreas hidrogeologicamente homogêneas melhora a precisão dos dados interpolados por krigagem (NIKROO et al., 2010).

A krigagem ordinária, de acordo com Landim (2003), concebe uma forma de estimação geral linear para uma variável regionalizada que não requer o conhecimento prévio da média e assume a hipótese de estacionaridade local (equação 3), podendo ser estimada imparcialmente segundo a resolução simultânea do conjunto de equações (4), (AHMADI; SEDGHAMIZ, 2007):

$$Z^*(x_p) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma^*(x_i, x_j) - \mu = \gamma(x_i, x) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (4)$$

Para os casos em que o processo estocástico não é estacionário, ou seja, o processo apresenta uma tendência, Ahmadi e Sedghamiz (2007) propõem o emprego da krigagem universal mediante resolução simultânea do conjunto de equações (5):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_j) - \sum_{i=1}^n \mu f(x_i) = \gamma(x_i, x) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i f(x_j) = f(x) \end{cases} \quad (5)$$

Onde:

$Z^*(x_p)$  é o valor *krigado* na localização do ponto  $x_p$ ;  
 $Z^*(x_i)$ , o valor conhecido na localização do ponto  $x_i$ ;

$\lambda_i$  é o peso associado aos dados;

$\mu$  é o multiplicador Lagrange;

e  $\gamma(x_i, x_j)$  é o valor do variograma correspondente para um vetor com origem em  $x_i$ , e extremidade em  $x_j$ .

## MONITORAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O monitoramento em águas subterrâneas engloba coleta, armazenamento, análise e interpretação de dados que contribuem para avaliação da variação temporal e espacial da reserva, dos recursos e da qualidade da água do aquífero (MESTRINHO, 2008). A medição



Figura 03 – Instrumento de medição de nível *Water Tape*.

Fonte: Foto de Autoria Própria. Instrumento disponível no Lab. de Hidráulica da UFG-Campus I (13/04/2016).

do nível do lençol freático na bacia do Botafogo foi realizada com o medidor elétrico *Water Tape*, que dispara ao tocar na superfície da água (Figura 03).

O levantamento planialtimétrico da bacia foi realizado através do instrumento geodésico GPS RTK Trimble R6 que integra um receptor de estação base (Figura 04, foto da esquerda) e um Rover (Figura 04, foto da direita).

A coleta dos dados de nível de água subterrânea da rede de monitoramento foi realizada mensalmente e contemplou períodos de seca e de chuva entre maio/2016 e junho/2017 (Quadro 01) de modo a constituir acervo hidrológico que possibilitasse estimar tendências em longo prazo através de análise estatística (ALLEY; TAYLOR, 2001)

Quadro 01 – Profundidade do aquífero livre na Bacia Hidrográfica do Córrego Botafogo.

Coordenadas UTM (m)			Profundidade (m)														
X	Y	Z	PM	mai/16	jun/16	jul/16	ago/16	set/16	out/16	nov/16	dez/16	jan/17	fev/17	mar/17	abr/17	mai/17	jun/17
686388	8151105	826	A	9,05	9,35	9,71	10,07	10,47	10,63	10,52	10,36	10,16	9,90	9,67	9,33	9,17	9,32
686220	8151367	827	B	6,74	7,01	7,32	7,68	7,99	7,86	7,50	7,35	7,35	7,05	6,81	6,60	6,49	6,69
688548	8152425	835	C	13,00	13,31	13,40	13,40	13,40	13,40	13,40	13,40	13,31	13,15	13,27	13,36	13,40	13,40
688383	8153403	809	D	7,00	8,16	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35
686915	8154445	763	E	7,36	7,47	7,63	7,79	7,93	7,71	7,77	7,71	7,69	7,52	7,44	7,35	7,39	7,56
685964	8154738	778	F	6,72	7,12	7,71	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02	7,64	7,04	6,86	6,83	7,23
685720	8154955	752	G	4,00	5,00	NC	9,06	9,31	9,13	8,95	8,74	8,98	8,61	8,35	8,30	8,36	8,61
686031	8155224	748	H	9,18	9,97	9,86	10,8	11,05	10,79	11,13	11,20	10,89	10,76	10,55	10,36	10,35	10,59
686960	8155879	762	I	2,51	2,55	2,55	2,30	2,78	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,53	2,55	2,53
685692	8155894	756	J	10,26	10,65	10,69	11,30	11,30	11,30	11,30	11,30	11,30	11,30	11,22	11,09	10,97	11,20
685702	8156448	743	K	6,45	6,28	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44	6,77	6,60	7,44	7,44	7,44	6,76	6,76
685502	8156513	727	L	6,20	6,77	6,23	6,23	6,23	6,23	6,23	5,93	5,93	5,93	5,93	5,93	5,93	5,93
685439	8157345	714	M	6,95	7,11	7,47	7,65	7,65	7,65	7,65	7,35	7,34	7,13	7,00	6,84	6,95	7,21
685174	8156696	724	N	7,6	7,83	8,09	8,28	8,08	8,01	7,99	6,89	7,88	7,64	7,47	7,32	7,31	7,58
686731	8157139	739	O	3,88	6,12	6,41	6,66	6,87	6,85	6,80	6,40	6,36	6,19	6,03	5,85	5,94	6,30
684460	8156102	724	P	9,30	9,6	9,25	10,24	10,60	10,67	10,65	10,33	10,40	10,03	9,72	9,67	9,56	9,87
684868	8156639	715	Q	NC	7,61	6,25	6,39	6,58	6,47	6,50	6,40	6,34	6,26	6,14	6,06	6,1	6,32
685523	8150323	851	R	NC	10,02	10,46	10,96	11,45	11,80	11,73	11,80	11,76	11,59	11,22	10,80	10,58	10,70
687017	8153260	779	S	NC	3,93	5,87	6,84	7,5	7,51	7,34	7,00	6,89	6,58	6,21	5,85	5,84	6,15
685808	8153847	781	T	NC	11,9	12,63	13,49	14,24	14,29	14,36	13,93	13,71	13,23	13,01	12,61	12,44	12,68
685382	8153851	776	U	NC	5,42	5,38	5,30	5,65	5,08	5,38	5,18	5,27	5,27	5,24	5,30	5,43	5,85
684508	8153039	806	V	NC	8,05	8,96	8,78	9,16	9,28	9,12	NC	9,09	NC	NC	NC	NC	NC
684628	8152864	815	W	NC	10,65	10,24	10,25	10,27	10,28	10,28	10,40	10,29	10,29	10,28	10,27	10,28	10,27
684785	8154363	750	X	NC	13,30	13,43	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,40	13,50

Fonte: Dados dos autores. Nota: colunas na cor rosa representam o período seco; em azul representam o período chuvoso; NC indica dado não coletado; dados em vermelho indicam a profundidade na qual o poço específico encontrava-se seco.



Figura 04 – GPS RTK Trimble R6.

Fonte: Foto de Autoria Própria. Instrumento disponível no Lab. de Hidráulica da UFG-Campus I (24/07/2017).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para inferir as cargas piezométricas em toda a área da bacia do Botafogo foram utilizados dados mensais dos níveis do lençol freático nos poços observados nos períodos de seca e chuva, no intuito de representar as flutuações do nível de água subterrânea na bacia.

O mês de setembro de 2016 foi o que representou maior número de poços secos, à jusante da bacia: para o total de 24 poços monitorados (PM), 09 encontravam-se secos. O PM – R apresentou a maior carga hidráulica do período seco, correspondente ao mês de junho/2016 apresentando carga hidráulica máxima equivalente a 841m. Nos meses secos de maio e junho de 2017, os poços D e E encontravam-se secos apresentando cargas hidráulicas equivalentes a 745m e 801m, respectivamente (Figura 05).

O nível d'água do PM – J rebaixou em média 0,63 m comparando-se os meses secos maio e junho de 2016 e o mesmo bimestre de 2017, de modo que, a 11,20m de profundidade, o poço encontrava-se seco (Quadro 01). A carga hidráulica média do PM – J foi de 745m (Figura 05).

Durante os meses de julho, agosto e setembro de 2016 do período seco, o poço C apresentou carga piezométrica média de 745m (Figura 05) e cota piezométrica de 13,40m (Quadro 01).

De modo análogo, o PM – C esteve seco em outubro, novembro e dezembro de 2016, meses chuvosos (Figura 05), apresentando nível d'água de janeiro a abril de 2017 (Quadro 1), voltando a ficar seco em maio e junho de 2017. No período chuvoso o PM - J apresentou nível d'água nos meses de março e

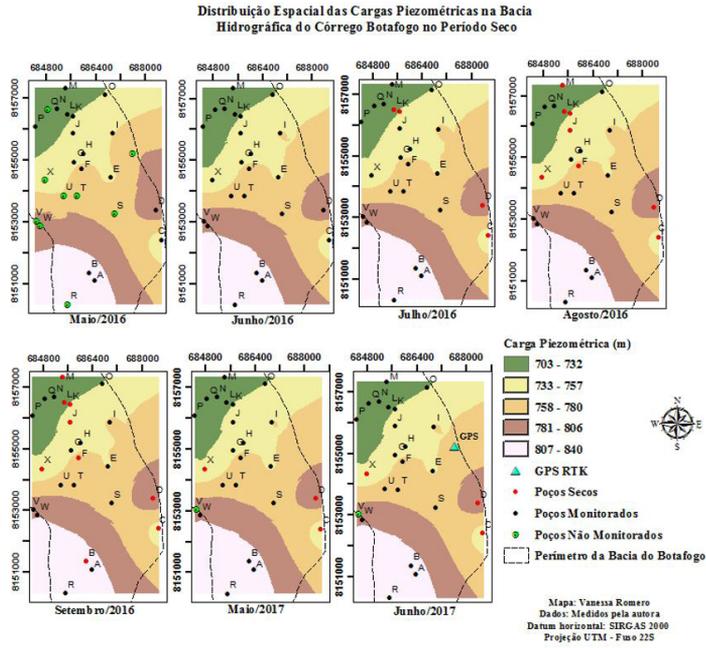


Figura 05 – Carga piezométrica do aquífero livre na área da bacia do Botafogo no período seco do ano de 2016 e nos meses secos de maio e junho do ano de 2017.  
 Fonte: Elaborado pelos autores com dados próprios.

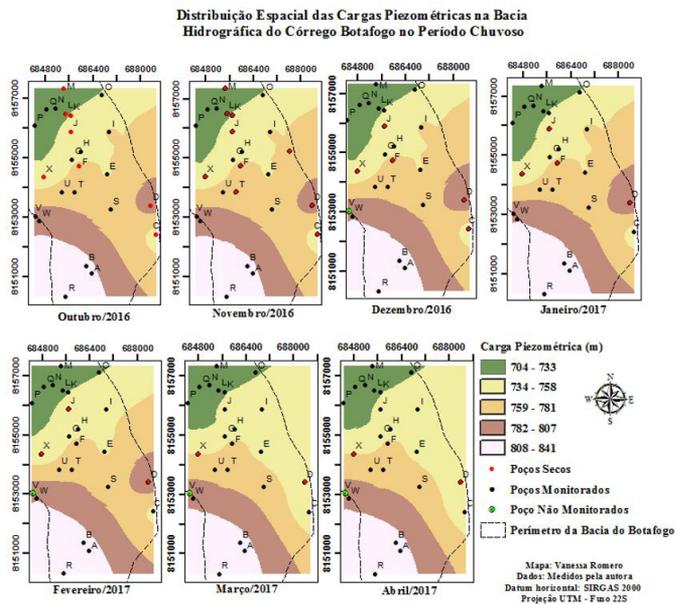


Figura 06 – Carga piezométrica na área da bacia do Botafogo no período chuvoso (outubro/2016 a abril/2017).  
 Fonte: Elaborado pelos autores com dados próprios.

abril de 2017 enquanto que o PM - T não apresentou nível d'água no mês de novembro/2016 (Figura 06).

O nível estático do PM - X no mês de maio/2017 correspondeu a 13,40m e a respectiva carga piezométrica à 737m. Para o mês de junho/2017 o mesmo poço estava seco há 13,50m do nível do terreno e com carga hidráulica de 736m (Figura 06).

Salienta-se que o poço M, situado na região norte da bacia do Botafogo, apresentou a menor carga hidráulica do intervalo de tempo contemplado pelo estudo, correspondente a 706m, entre os meses de julho/2016 e janeiro/2017 (Figuras 05 e 06), período em que se encontrava seco, a 7,65m de profundidade (Quadro 01).

Os poços A, E, G, H, I, N, O, P, Q, R, S, U, V e W apresentaram nível d'água durante todos os meses monitorados (Figuras 05 e 06).

Os poços D e X não apresentaram nível d'água ao longo do período chuvoso contemplado neste estudo, bem como os poços K, L e M, nos meses de outubro e novembro de 2016 ao passo que o poço PM - F esteve seco de outubro de 2016 a janeiro de 2017 (Figura 06).

### 3. CONCLUSÃO

Comparando-se os resultados do período contemplado por este estudo, notou-se maior flutuação do nível de água subterrânea na bacia do córrego Botafogo nos meses secos de maio de 2016 e maio de 2017 (aproximadamente 0,40 m) de modo que os poços de monitoramento C e D estiveram secos no ano de 2017.

Os meses de Agosto/2016 e Setembro/2016 (período seco) apresentaram as maiores quantidades de poços secos, ratificando o grau de urbanização da bacia, relacionado às pequenas porções de vegetação da área que influenciam no escoamento das águas da chuva, bem como no ciclo hidrológico da bacia, cuja área sofre modificações sob efeito de degradação ambiental de modo que a quantidade de água subterrânea pode variar conforme as características de eventos de chuva (duração e intensidade), assim como em virtude das características hidrogeológicas e de variáveis como pressão atmosférica.

Conclui-se que as variações do nível d'água observadas nos 24 pontos monitorados na bacia do Botafogo entre maio/2016 e junho/2017 exigem acompanhamento da evolução do rebaixamento do lençol freático e respectiva implantação de estratégias que interrompam e revertam os efeitos da degradação na bacia, através planejamento e regulamentação de diretrizes de gestão dos sistemas integrados.

### 4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás), à UFG/EECA/PPGEAS (Universidade Federal de Goiás / Escola de Engenharia Civil e Ambiental / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) e à DBO Engenharia LTDA pelo fomento que viabilizou o desenvolvimento deste trabalho.

### 5. REFERÊNCIAS

- AHMADI, S. H.; SEDGHAMIZ, A. Application and evaluation of kriging and cokriging methods on groundwater depth mapping. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 138, n. 1, p. 357-368, 2008.
- AHMADI, S. H.; SEDGHAMIZ, A. Geostatistical analysis of spatial and temporal variations of groundwater level. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 129, n. 1-3, p. 277, 2007.
- ALLEY, W. M.; TAYLOR, C. J. The value of long-term groundwater level monitoring. *Ground Water*, v. 39, n. 6, p. 801-802, 2001.
- BERVEGLIERI, A.; MENEGUETTE, M.; PITERI, M. A. *Aplicação do interpolador krigagem em modelos digitais de terrenos, comparando-se os casos de isotropia e anisotropia*. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., p. 7222-7229, 2011.

- CAMARGO, E. C. G. *Geoestatística: fundamentos e aplicações – Geoprocessamento para projetos ambientais*. São José dos Campos: INPE, 1998.
- CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. *Análise espacial de superfícies*. Brasília: Embrapa, 2004.
- CASSETI, V. Geomorfologia do município de Goiânia. *Boletim Goiano de Geografia*, Goiânia, v. 12, n. 1, p. 64-85, 1992.
- DESBARATS, A. J. et al. On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 255, n. 1, p. 25-38, 2002.
- GOIÂNIA. *Diagnóstico ambiental da sub-bacia do córrego Botafogo*. Agência Municipal de Meio Ambiente – AMMA, 2008.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989.
- KUMAR, S.; SONDEHI, S. K.; PHOGAT, V. Network design for groundwater level monitoring in upper Bari Doab canal tract, Punjab, India. *Irrigation and Drainage*, v. 54, n. 4, p. 431-442, 2005.
- LANDIM, P. M. B. *Análise estatística de dados geológicos*. 2. ed. São Paulo: Unesp, 2003.
- MANZIONE, R. L.; MARCUZZO, F. F. N.; WENDLAND, E. *Modelagem de níveis freáticos em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani sob diferentes usos do solo*. Águas Subterrâneas, 2010.
- MARCUZZO, F. F. N.; ANDRADE, L. R.; MELO, D. C. R. Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado do Mato Grosso (Interpolation Methods in Mathematics of Rainfall Mapping of the State of Mato Grosso). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 4, n. 4, p. 793-804, 2012.
- MARCUZZO, F. F. N.; CARDOSO, M. R. D.; MELLO, L. T. A. Uso dos métodos de krigagem e spline de tensão no mapeamento de chuvas na região metropolitana de Goiânia e seu entorno. In: II SIMPÓSIO INTERNACIONAL CAMINHOS ATUAIS DA CARTOGRAFIA NA GEOGRAFIA, 2., 2010, São Paulo. *Anais...* São Paulo: EDUSP, 2010. p. 128-128.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, v. 58, n. 8, p. 1246-1266, 1963.
- MESTRINHO, S. S. P. Monitoramento em água subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, 2008. p. 673-686.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. A. *Hidrologia estatística*. CPRM, 2007.
- NIKROO, L. et al. Groundwater depth and elevation interpolation by kriging methods in Mohr Basin of Fars province in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 166, n. 1-4, p. 387-407, 2010.
- PRAKASH, M. R.; SINGH, V. S. Network design for groundwater monitoring—a case study. *Environmental Geology*, v. 39, n. 6, p. 628-632, 2000.
- ROMERO, V., FORMIGA, K. T. M., MARCUZZO, F. F. N. Estudo hidromorfológico de Bacia Hidrográfica Urbana em Goiânia/GO. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 39, n. 2, p. 320 – 340, 2017.
- SÁ, V. R. *Aplicação de métodos geoestatísticos no estudo das distribuições espaciais de condutividade hidráulica em áreas do Sistema Aquífero Guarani (SAG) e do Sistema Aquífero Bauru (SAB) no Estado de São Paulo*. 2016. 198 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE GÓIAS. *Hidrogeologia do estado de Goiás e Distrito Federal*. Goiânia: Superintendência de Geologia e Mineração, 2006. (Série Manuais).

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. *Unidades aquíferas no município de Goiânia/GO e Entorno*. Goiânia: Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2016. (Série Manuais).

UHLEIN, A. et al. Tectônica da faixa de dobramentos Brasília – setores setentrional e meridional. *Genomos*, v. 20, n. 2, p. 1-14, 2012.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

**Vanessa Romero** Universidade Federal do Estado de Goiás – UFG; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária (Mestrado em Engenharia Ambiental e Sanitária). Laboratório de Hidráulica, EECA, Bloco H, Goiânia-GO, Brasil. email: vromero.fe@gmail.com

**Contribuição do autor**

Pesquisa realizada como parte de estudo de dissertação de mestrado da autora.

**Klebber T. M. Formiga** Universidade Federal do Estado de Goiás – UFG; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária (Orientador). EECA - Laboratório de Hidráulica (Chefe de Laboratório e Professor Adjunto); Goiânia-GO, Brasil. email: klebber.formiga@gmail

**Contribuição do autor**

Orientador do autor 01; participação na coleta de campo; participação na análise dos dados e escrita do artigo.

**Diego de Sousa Romero** Instituto Federal de Goiás – IFG, Bacharelado em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura; Departamento de Áreas Acadêmicas 3; Campus Goiânia-GO, Brasil. email: diego.sousa.romero@gmail.com

**Contribuição do autor**

Participação nas coletas de campo e na análise dos dados.