

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA - PPGEAS**

VANESSA ROMERO

**MONITORAMENTO E MODELAGEM DA QUANTIDADE
DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA BACIA DO CÓRREGO
BOTAFOGO, GOIÂNIA, GOIÁS**

GOIÂNIA

2018

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS
DE TESES E
DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

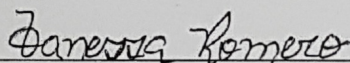
Nome completo do autor: Vanessa Romero

Título do trabalho: Monitoramento e Modelagem da Quantidade de Água Subterrânea na Bacia do Córrego Botafogo, Goiânia, Goiás.

3. Informações de acesso ao documento:

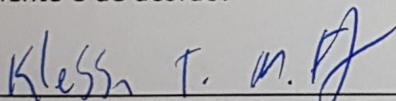
Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



Vanessa Romero

Ciente e de acordo:



Klebber Teodomiro Martins Formiga

Data: 28 / 04 / 2018

¹Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente
- Submissão de artigo em revista científica
- Publicação como capítulo de livro
- Publicação da dissertação/tese em livro

²A assinatura deve ser escaneada.



**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA
DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o(a) autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico:
Dissertação [] Tese



2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Nome completo do(a) autor(a): *Vanessa Romero*

Título do trabalho: *Monitoramento e Modelagem da Quantidade de Água Subterrânea na Bacia do Corrego Bota fogo*

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM
[] NÃO

Independente da concordância com a disponibilização eletrônica, é imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

Vanessa Romero
Assinatura do(a) autor(a)

Ciente e de acordo:

Kleber Tadeu M. Formiga

Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 06 / 06 / 22

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA - PPGEAS**

VANESSA ROMERO

**MONITORAMENTO E MODELAGEM DA QUANTIDADE
DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA BACIA DO CÓRREGO
BOTAFOGO, GOIÂNIA, GOIÁS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Goiás como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga

Goiânia

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Romero, Vanessa

MONITORAMENTO E MODELAGEM DA QUANTIDADE DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA BACIA DO CÔRREGO BOTAFOGO, GOIÂNIA, GOIÁS [manuscrito] / Vanessa Romero. - 2018.

55 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Goiânia, 2018.

Bibliografia.

Inclui siglas, mapas, fotografias, gráfico, tabelas.

1. Métodos de Interpolação. 2. Parâmetros Hidráulicos. 3. Modelagem de Fluxo. I. Formiga, Klebber Teodomiro Martins, orient. II. Título.




CDU 628.1

ATA DE DEFESA 003/2018

Mestrando (a): **VANESSA ROMERO**

Título da Dissertação: **MONITORAMENTO E MODELAGEM DA QUANTIDADE DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA BACIA DO CÓRREGO BOTAFOGO, GOIÂNIA, GOIÁS**

2. Comissão Examinadora: (PROFESSORES DOUTORES)

NOME	FUNÇÃO	ASSINATURA	AValiação
Klebber Teodomiro Martins Formiga	Presidente/Orientador		APROVADO
José Vicente Granato de Araújo (EECA)	Exam. Externo		APROVADO
Saulo Bruno Silveira e Souza (EECA)	Suplent Exam. Externo		
Alexandre Kepler Soares (PPGEAS)	Examinador Interno		APROVADA
Joel Roberto Guimarães Vasco (PPGEAS)	Suplent Exam. Interno		

3. Resultado:

A Banca Examinadora, em 29/03/2018, 15 horas, na EECA - UFG, após o exame da Defesa da Dissertação e arguição do candidato, decidiu:

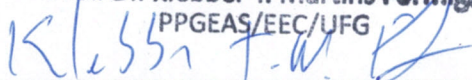
- Pela aprovação do(a) candidato(a) por unanimidade;
 Pela aprovação do(a) candidato(a) por maioria;
 Pela reprovação do(a) candidato(a) por unanimidade;
 Pela reprovação do(a) candidato(a) por maioria.

Preencher após reformulação:

- O(A) aluno(a) apresentou as modificações sugeridas no prazo de 30 dias e a dissertação foi aprovada;
 O(A) aluno(a) não apresentou as modificações sugeridas pela banca.

Autenticação
Presidente da Comissão Examinadora
29 de março de 2018

Prof. Dr. Klebber T. Martins Formiga
PPGEAS/EEC/UFG



Autenticação após reformulação
Presidente da Comissão Examinadora

28/04/2018

Assinatura do candidato:


Vanessa Romero

Aos meus pais, Lina Ribeiro e Romero, que honrosamente me ensinaram, com teoria e prática, o valor da família e do caminho da honestidade, da persistência! “A palavra convence, o exemplo arrasta.” Quão nobre é a alma daquele que tem, em essência, hombridade! Deleite...

AGRADECIMENTOS

Ao Fôlego de Vida que está em cada fração de segundo da minha caminhada, Onipresente, de conhecimento infinito sobre mim e todas as coisas; Onisciente, que é todo-poderoso; Onipotente... O Dono da Verdade!

À minha família... Em essência aos meus pais, Lina Ribeiro e Ruber Paulo Romero, ao meu irmão Diego, à minha madrinha Márcia e à minha adorável prima Mariah, por todo amor, cuidado, compreensão e incentivo para concretização dos meus sonhos e anseios. Minha gratidão eterna por cada um deles, os quais me ensinaram o valor que eu tenho diante da vida! Aos meus tão queridos irmãozinhos, Rhuan Pablo e Aleksander, por inspirarem esperança. Aos meus amigos, Reny e Mário, aos meus avós, Guerra (*in memorian*), Terezinha e Eliza por sorrirem, rezarem e pensarem em mim, sempre.

Ao meu orientador, Prof. Formiga, pelo seu dom no ensino da ciência, com altruísmo, sem vaidade, em prol dos recursos hídricos sustentáveis. O meu reconhecimento pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa ao lado de quem transpira sabedoria e inspira entusiasmo. Meu respeito e admiração pela sua hombridade, serenidade, paciência e amizade, Professor. Qualquer palavra de grandeza é pequena para representar a imensidão do seu conhecimento e da sua simplicidade. Quem, embora todos os títulos conquistados ao longo da jornada, ensina sem um pinga de soberba, com tamanha humildade e amor genuíno...

À Escola de Engenharia Civil e Ambiental e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária (PPGEAS) da Universidade Federal de Goiás (UFG), em atenção ao coordenador Prof. Dr. Joel Roberto Guimarães Vasco pela compreensão, auxílio e dedicação perante os momentos de dificuldades e de transtornos.

Ao Departamento de Transportes (DT), tão fidedignamente representado pelos colaboradores Elvisley Eudes Alves, Jorge Luiz Gomes de Sousa, Flávio Junio Santos de Oliveira e Vinícius Nunes, que forneceram todo suporte necessário à pesquisa.

Ao consultor Dr. Luiz Ferrari e à Prof^ª. Dra. Alexandra Vieira Suhogusoff do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP) pelo auxílio na pesquisa somado à disposição em compartilhar o amplo conhecimento técnico e acadêmico em geociências, com ênfase em hidrogeologia, recursos hídricos e modelagem ambiental de fluxo subterrâneo.

À FUNCAMP pelo financiamento do equipamento que possibilitou a realização do estudo e à FAPEG pelo fornecimento da bolsa de estudo. À Coordenação do PPGEAS, em especial à Deuzélia por todo incentivo nas etapas do mestrado, pela solidariedade e palavras afáveis nos momentos difíceis da caminhada.

Aos meus saudosos mestres e amigos, Sândra Emília Carrijo, Mirian V. Sá Fortes Menezes, Cláudia Peres, Josefa Maria, Rosana Barros, Rosângela Mendanha da Veiga e Viníciu Fagundes Bárbara que contribuíram em conhecimento e verdade para a minha formação acadêmica e estudantil.

À DBO Engenharia pelo incentivo e investimento na vida profissional, no que tange ao aprendizado acerca dos recursos naturais. Particularmente, minha gratidão ao meu diretor (e também professor) Jadson de Araújo Pires, e à minha amiga e parceira de jornada, Anna Laura Telles dos Santos. Esta grande incentivadora me estimulou a seguir em frente e não desistir nunca. Sempre disposta, me amparou em inúmeros aspectos para concluir meu curso de mestrado.

Ao pesquisador, Francisco Marcuzzo, fonte de conhecimento e inspiração no âmbito da Ciência, Pesquisador em Geociências do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), bem, como os queridos geólogos da mesma instituição de pesquisa, Maurício e Márcio que me instruíram com tanto labor.

Ao Prof. Dr. João Paulo Magna Júnior do curso de Geoprocessamento do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), às amigas e companheiras de batalha, Aline de Arvelos Salgado, Layara de Paula Sousa Santos, Daiane Pereira, Kamila Almeida e Tatiane Souza do CIAMB/UFG, cuja contribuição foi fundamental no desenvolvimento do estudo e sem as quais eu não seria capaz de concluir minha pesquisa.

À banca examinadora, representada pelos incomparáveis professores, Dr. Alexandre Kepler Soares e Dr. José Vicente Granato que disponibilizaram seu tempo e mostraram interesse para participarem da comissão julgadora.

Por fim, saldo a todos aqueles que contribuíram, em conhecimento e trabalho ou em oração! A realização de um projeto de pesquisa como este só foi possível com o apoio de todo o conjunto. Vocês são muito especiais... Fonte de inspiração!

Amo-vos infinitamente...

RESUMO

O desenvolvimento desta pesquisa objetivou avaliar o comportamento do lençol freático na bacia hidrográfica do córrego Botafogo em Goiânia/Goiás, através do monitoramento e modelagem matemática do aquífero livre, utilizando dados do nível do lençol, medidos no período de seca e chuva, entre maio/2016 e junho/2017. O monitoramento foi realizado através da medição do nível das águas subterrâneas, com o medidor elétrico *Water Tape*, em poços de monitoramento distribuídos pela bacia. Estes dados de nível piezométrico auxiliaram na obtenção das cargas hidráulicas observadas e constituíram dados de entrada para interpolação da carga hidráulica que entrou como condição inicial na modelagem do lençol freático da área de estudo. Comparando-se os resultados do período seco contemplado em 2016 e 2017 por este estudo, notou-se maior flutuação do nível de água subterrânea. A condição de contorno de carga definida na calibração da condutividade hidráulica da bacia do Botafogo foi de fluxo local, possibilitando a estimativa da recarga e o cálculo da vazão de saída na bacia em regime permanente. No regime de fluxo transiente observou-se que, com o aumento da condutividade hidráulica, o nível do lençol freático subiu, na zona de jusante da bacia do Botafogo, porém permaneceu contínuo ao longo do tempo, em termos do maior valor calibrado para o parâmetro armazenamento específico ($0,48 \text{ m}^3/\text{dia}$). Portanto a oscilação do nível do lençol freático na área de abrangência da bacia do Botafogo pode ser refletida, tanto na recarga ocasionada pela precipitação, quanto na variação da carga hidráulica (cujo aumento tende a rebaixar o lençol).

Palavras-chave: Métodos de Interpolação, Parâmetros Hidráulicos, Modelagem de Fluxo.

ABSTRACT

The development of this research aimed to evaluate the behavior of the groundwater in the catchment area of the Botafogo stream in Goiânia / Goiás, through the monitoring and mathematical modeling of the free aquifer, using data from the level of the sheet, measured in the period of drought and rain, between May / 2016 and June / 2017. Monitoring was performed by measuring the groundwater level with the Water Tape electric meter in monitoring wells distributed throughout the basin. These piezometric level data helped to obtain the observed hydraulic loads and constituted input data for interpolation of the hydraulic load that entered as an initial condition in the modeling of the water table of the study área. Comparing the results of the dry period contemplated in 2016 and 2017 by this study, we noticed a greater fluctuation of groundwater level. The load contour condition defined in the calibration of the hydraulic conductivity of the Botafogo basin was of local flow, making possible the estimation of the recharge and the calculation of the outflow in the basin in permanent regime. In the transient flow regime, it was observed that, with the increase of hydraulic conductivity, the level of the water table rose, in the zone downstream of the Botafogo basin, but remained continuous over time, in terms of the highest value calibrated for the parameter storage ($0.48 \text{ m}^3/\text{day}$). Therefore, the fluctuation of the groundwater level in the catchment area of the Botafogo basin can be reflected both in the recharge caused by the precipitation and in the variation of the hydraulic load (the increase of which tends to degrade the water table).

Keywords: Interpolation Methods, Hydraulic Parameters, Flow Modeling.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	13
Estrutura da Dissertação	14
Referências	15
CAPÍTULO I – MONITORAMENTO DO LENÇOL FREÁTICO DA BACIA DO CÓRREGO BOTAFOGO	16
1. INTRODUÇÃO	16
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	17
2.1. Localização da Bacia Hidrográfica do Córrego Botafogo	17
2.2. Uso e Ocupação do Solo na Área da Bacia do Córrego Botafogo	18
2.3. Bioma, Densidade Demográfica e Altimetria da Bacia do Botafogo	19
2.4. Declividade e Hidrografia da Bacia do Córrego Botafogo	20
2.5. Geologia, Aspectos Climáticos e Fisiográficos da Bacia do Botafogo	21
2.6. Geomorfologia e Solos da Bacia do Córrego Botafogo	21
2.7. Hidrogeologia da Bacia do Córrego Botafogo	22
3. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA E MÉTODOS	24
3.1 Semivariograma	24
3.2 Krigagem	25
3.3 Monitoramento das Águas Subterrâneas	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5. CONCLUSÃO	30
6. REFERÊNCIAS	31
CAPÍTULO II – MODELAGEM DA QUANTIDADE DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA BACIA DO BOTAFOGO – GOIÂNIA/GO	33
1. INTRODUÇÃO	34
2. MATERIAL E MÉTODOS	35

2.1. Caracterização da Área de Estudo	35
2.2. Monitoramento do Nível Freático na Bacia de Estudo	37
2.3. Construção do Modelo Conceitual	38
<i>2.3.1. Condições de Contorno e Topografia da Bacia do Botafogo</i>	38
2.4. Modelo Matemático e Processo de Calibração	48
<i>2.4.1. Calibração dos Parâmetros do Modelo da Bacia do Botafogo</i>	50
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	54
5. REFERÊNCIAS	54
CONSIDERAÇÕES FINAIS	57

INTRODUÇÃO GERAL

Devido à baixa susceptibilidade à contaminação e em razão da grande capacidade de armazenamento, comparada às águas superficiais, as águas subterrâneas são consideradas importante fonte de abastecimento (SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO, 2006). Além disso, surgem como alternativa de uso na agricultura, indústria e abastecimento urbano (HORNBECK *et al.*, 1993; VÖRÖSMARTY *et al.*, 2004), e manutenção de ecossistemas, uma vez que representam aproximadamente 30% de toda água doce disponível no planeta, acumulada entre gretas, fraturas e espaços vazios existentes nas rochas e solo (SHIKLOMANOV, 1998).

Em termos globais, os conflitos entre o uso do solo e as ações antrópicas geradoras de impactos nas bacias hidrográficas demonstram a importância em ser efetivado um plano de ação que oriente o uso e manejo dessas áreas em razão do esgotamento dos recursos hídricos. Além disso, as mudanças climáticas previstas tendem a desregular a ocorrência de chuvas, seja em frequência ou quantidade, comprometendo o regime de recarga de aquíferos.

Nesse sentido, o monitoramento sistemático em bacias hidrológicas é de grande valia quando se pretende quantificar as disponibilidades hídricas de uma região, e constitui ferramenta de gestão que visa o controle ambiental. O monitoramento, portanto, contribui para o gerenciamento integrado dos recursos hídricos, incluindo o acompanhamento da flutuação dos níveis de água subterrânea, fornecendo subsídios para modelagem de sistemas aquíferos.

Levando-se em consideração o tipo de aquífero a ser modelado, os parâmetros hidrogeológicos podem ser representados em modelos matemáticos que simulam condições de recarga e descarga de um sistema (BABIKER *et al.*, 2005; BEDIANT *et al.*, 1994), auxiliando na elaboração de planos de gestão de recursos hídricos e favorecendo a tomada de decisão a partir da análise dos resultados da modelagem.

O objetivo desta pesquisa foi simular o comportamento do lençol freático na área urbana contemplada pela bacia hidrográfica do córrego Botafogo, no município de Goiânia/GO, durante os períodos de seca e de chuva, visando fornecer informações sobre a flutuação do lençol, bem como de recarga, através da modelagem dos dados observados em campo no *software* de águas subterrâneas *GMS (Groundwater Modeling System)* (Aquaveo®, 2017), cuja família de códigos inclui o modelo de fluxo tridimensional *MODFLOW (Modular Three-Dimensional Groundwater Flow Model)* (MCDONALD; HARBAUGH, 1988).

Estrutura da Dissertação

Esta dissertação foi elaborada sob a forma de artigo, de acordo com a área de avaliação contemplada pelo PPGEAS (Engenharias I) e conforme normas de submissão dos periódicos Revista de Gestão de Água da América Latina (REGA) e revista da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), Capítulos I e II, respectivamente. O Capítulo I abrange a caracterização da área de abrangência da bacia do córrego Botafogo, mediante coleta, tratamento e compilação de dados raster e vetoriais em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), o monitoramento do nível do lençol freático na bacia, através de medidor elétrico, e as respectivas inferências da carga hidráulica, calculada inicialmente, a partir das cotas topográficas medidas pelo GPS RTK TRIMBLE R6 e dos respectivos níveis estáticos dos poços monitorados. O Capítulo II trata da modelagem do lençol freático na área da bacia de estudo contemplando a avaliação da recarga e informações dos parâmetros hidráulicos inter-relacionados ao estado de perturbação do lençol. Nesta etapa do trabalho serão mostradas também as vantagens da utilização do método numérico para a modelagem da bacia urbana, segundo a quantidade de dados de entrada necessários para a modelagem (condições iniciais, de contorno e parâmetros do aquífero).

REFERÊNCIAS

AQUAVEO™. Escritório de engenharia de *software* e serviços de consultoria em modelagem de águas subterrâneas e superficiais (Provo, Utah). **GMS - Groundwater Modeling System**, versão 10.3. EUA, Copyright © 2007 Aquaveo, LLC. Disponível em: <<https://www.aquaveo.com/>>.

BABIKER, I. S.; MOHAMED, M. A.; HIYAMA, T.; KATO, K. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. **Science of the Total Environment**, v. 345, n. 1, p. 127-140, 2005.

BEDIENT, P. B.; RIFAI, H. S.; NEWELL, C. J. **Ground Water Contamination: Transport and Remediation**. Prentice-Hall, PTR, New Jersey, 1994.

HORNBECK, J. W.; ADAMS, M. B.; CORBETT, E. S.; VERRY, E. S.; LYNCH, J. A. Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northeastern USA. **Journal of Hydrology**, v. 150, n. 2, p. 323-344, 1993.

MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. 1988. **A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model**. U.S. Geological Survey, Book 6, chapter A1.

SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO (Goiás). Superintendência de Geologia e Mineração. **Hidrogeologia do estado de Goiás e Distrito Federal**. Goiânia, 2006. 236 p. (Série Manuais).

SHIKLOMANOV, I. A. **World Water Resources**, 1998. A new appraisal and assessment for the 21st century. Paris: International Hydrological Programme/UNESCO, 1998. 37p.

VÖRÖSMARTY, C.; LETTENMAIER, D.; LEVEQUE, C.; MEYBECK, M.; PAHL-WOSTL, C.; ALCAMO, J.; COSGROVE, W.; GRASSL, H.; HOFF, H.; KABAT, P.; LANSIGAN, F.; LAWFORD, R.; NAIMAN, R. Humans transforming the global water system. **Eos, Transactions American Geophysical Union**. Germany, v. 85, n. 48, p. 509-520, 2004.

CAPÍTULO I

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

MONITORING THE WATER TABLE IN THE BOTAFOGO WATERSHED - GOIÂNIA/GO

RESUMO

A geoestatística 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 geoestatística de *krigagem* foi empregada para interpolar as cargas piezométricas em locais não amostrados levando em consideração as características hidrogeológicas, climatológicas e de vegetação da área. As cotas altimétricas foram obtidas em programa *SIG (Sistema de Informações Geográficas)* através de dados do projeto *SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission)*. 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 o nível d'água do Poço de Monitoramento "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: *krigagem*, águas subterrâneas, carga piezométrica.

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 piezometric heads in non-sampled sites taking into account the hydrogeological, climatological and vegetation characteristics of the area. The altimetric dimensions were obtained in *GIS (Geographic Information System)* program through *SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission)* 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 Monitoring Well "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: *kriging*, groundwater, piezometric head.

1. INTRODUÇÃO

No intuito de avaliar o comportamento das variações dos níveis de água subterrânea ao longo dos anos, a geoestatística é uma ferramenta bem difundida para interpolação de dados espaciais (DESBARATS et al., 2002; KUMAR et al., 2005; NIKROO et al. 2010; BERVEGLIERI et al., 2011), por meio de funções locais, baseados na *krigagem*, na triangulação e no inverso do quadrado da distância (AHMADI; SEDGHAMIZ, 2008).

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

Neste estudo, a geostatística foi empregada na análise das variações espaciais e temporais das flutuações das águas subterrâneas na bacia do córrego Botafogo, em Goiânia/GO, através de interpolação, por *krigagem*, das cargas piezométricas em locais não amostrados.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DA BACIA

2.1. Localização da Bacia Hidrográfica do Córrego Botafogo

A bacia do Botafogo é sub-bacia do Ribeirão Anicuns (Figura 01) que, por sua vez, é sub-bacia do rio Meia-Ponte e encontra-se, em sua maior parte, inserida na área urbana de Goiânia (Figura 01).

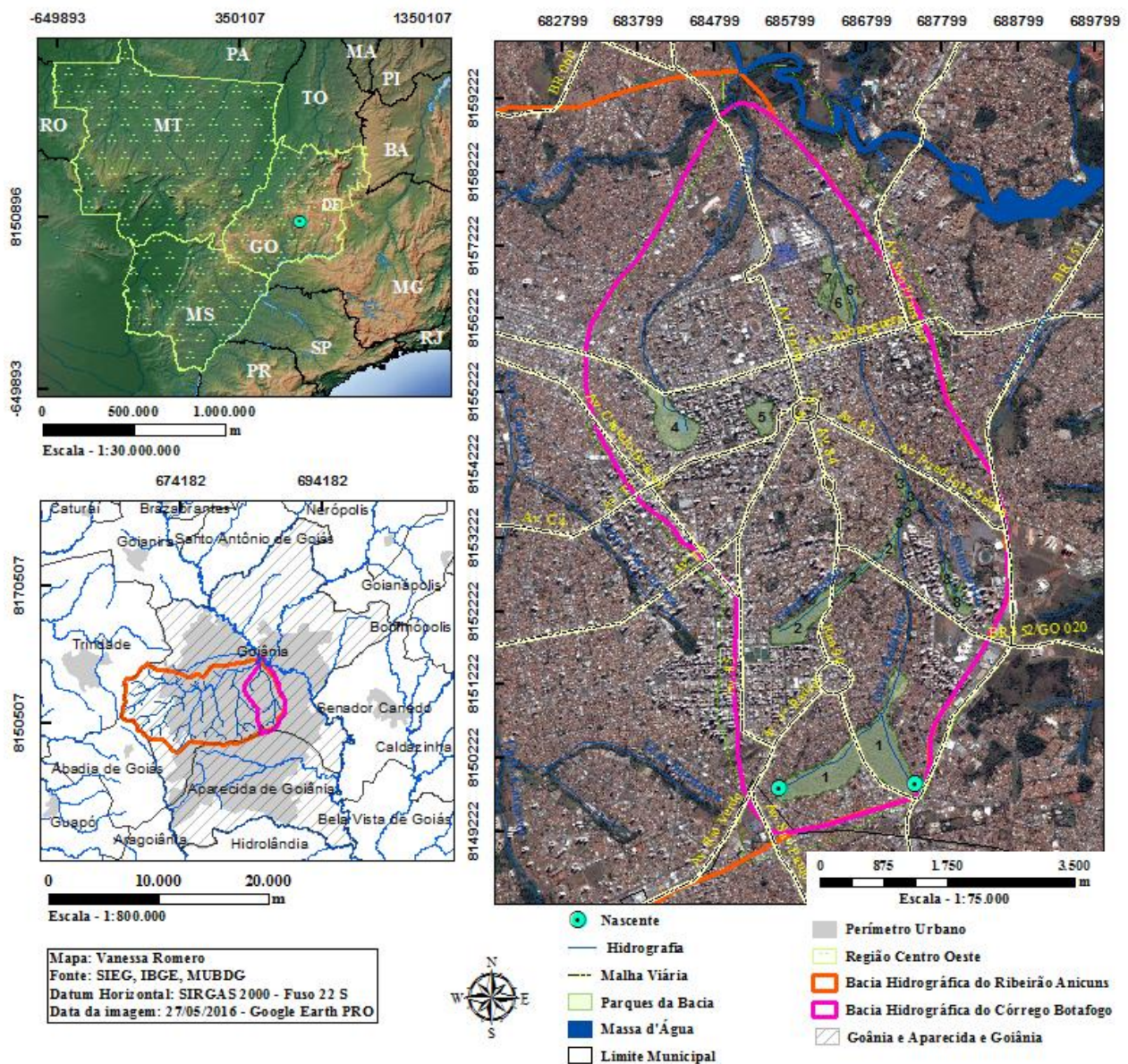


Figura 01 - Mapa de localização da bacia do córrego Botafogo.

Fonte: Romero et al. (2017).

Geograficamente, a bacia hidrográfica do Córrego Botafogo localiza-se entre os paralelos 682852 e 688852 e meridianos 8145843 e 8165843, abrangendo os municípios de Goiânia e Aparecida de Goiânia da região centro-oeste do Brasil, Estado de Goiás.

2.2. Uso e Ocupação do Solo na Área da Bacia do Córrego Botafogo

A área de estudo encontra-se consideravelmente antropizada, vide uso e ocupação inadequados da zona de amortecimento da bacia, que se encontra urbanizada. 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. De acordo com a base cartográfica do Mapa Urbano Básico Digital de Goiânia (MUBDG) existem 174 poços tubulares devidamente cadastrados e/ou outorgados instalados na bacia, além de 3 subestações de energia e 8 parques (Figura 02).

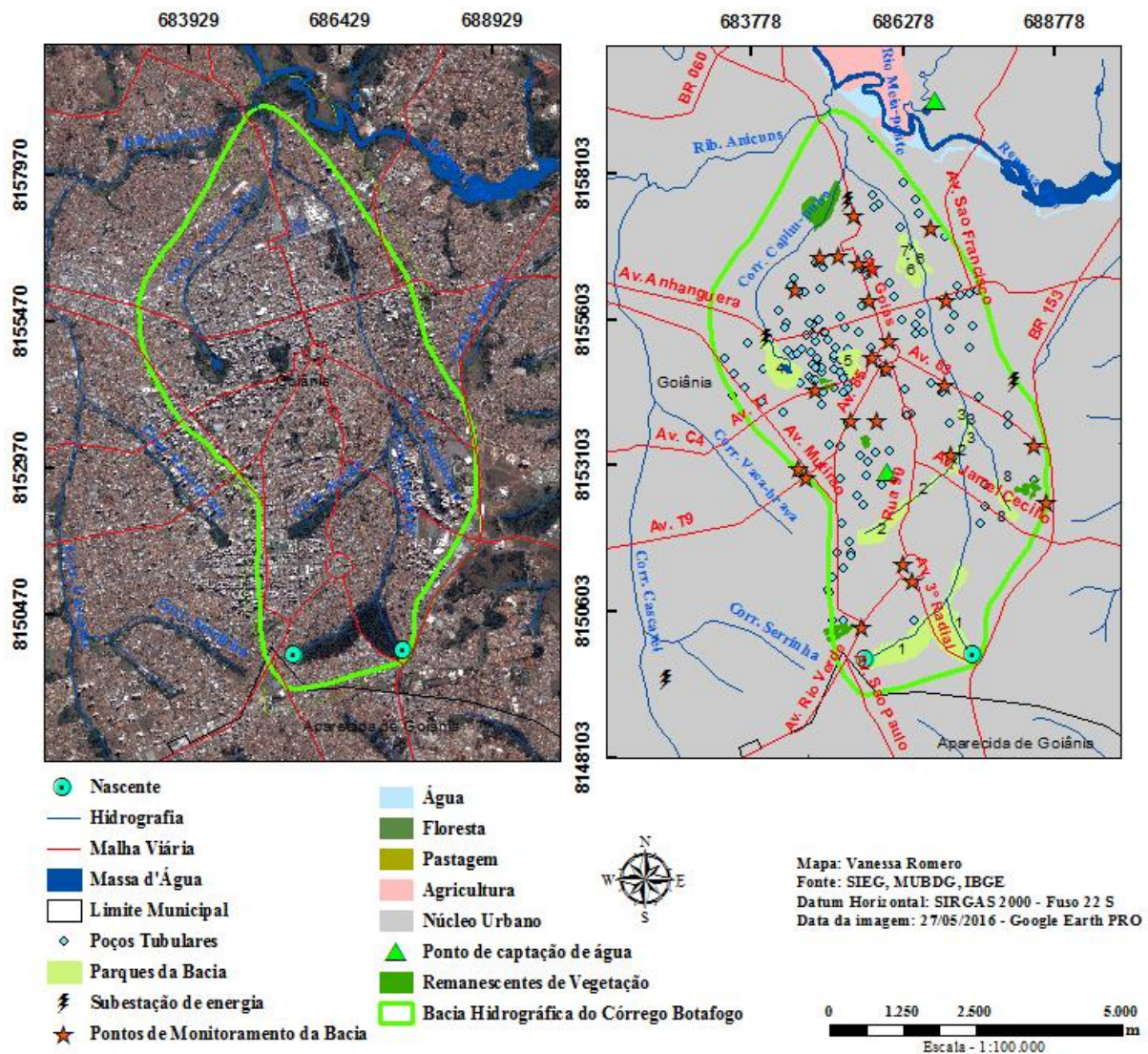


Figura 02 – Mapa de Uso/Ocupação do Solo na bacia do córrego Botafogo.

Fonte: Romero *et al.* (2017).

O bioma cerrado contempla toda a cidade de Goiânia e Aparecida de Goiânia, vegetação típica de regiões com estações climáticas seca e chuvosa. Pequena porção ao sudeste do estado está inserida na Mata Atlântica (ROMERO; FORMIGA; MARCUZZO, 2017). 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.

2.4. Declividade e Hidrografia da Bacia do Córrego Botafogo

A área de interesse consiste em uma sub-bacia hidrográfica da bacia do Ribeirão Anicuns. O córrego Botafogo é o principal corpo hídrico da bacia, com extensão aproximada de 11,3 km (da nascente ao exutório, no ribeirão Anicuns). O córrego Botafogo possui três sub- afluentes: pela margem direita, o córrego Sumidouro, e pela margem esquerda, os córregos Areião e Capim-Puba. As características do relevo da bacia indicam predominância de declividades inferiores a 7% em uma área de aproximadamente 30,88 km² (Figura 04).

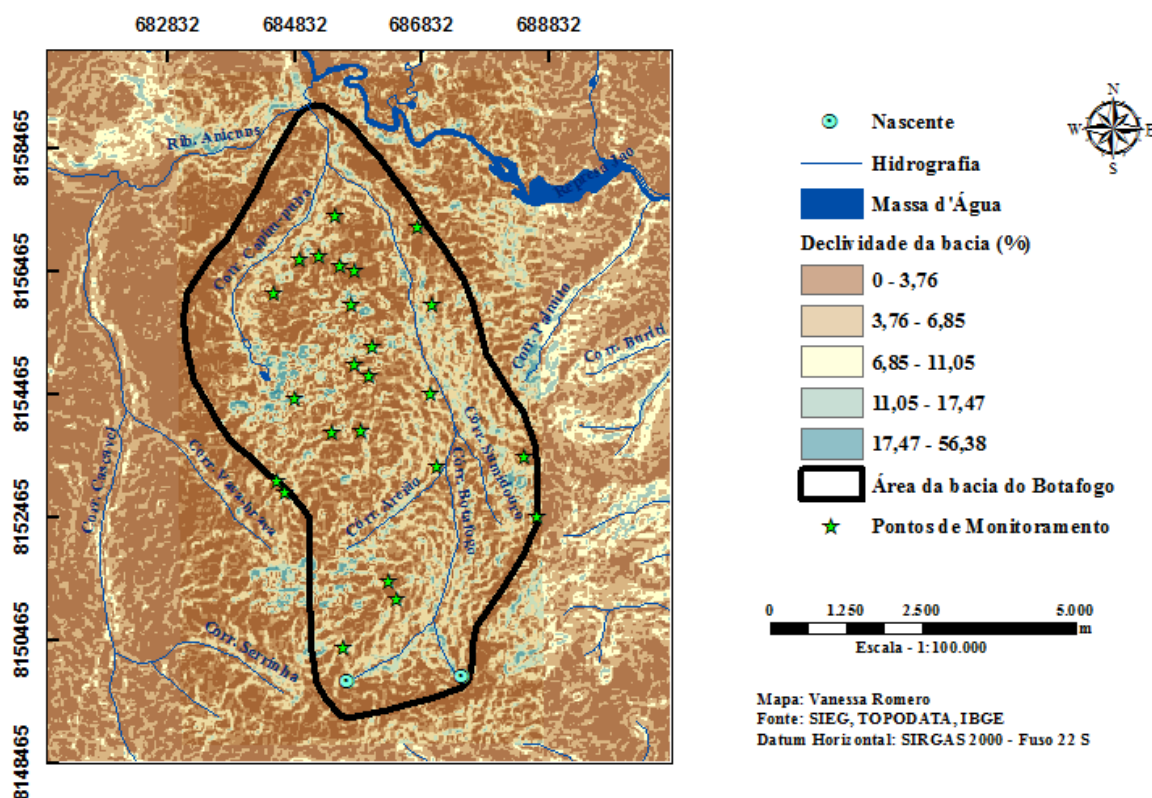


Figura 04 – Mapa de declividade e hidrografia da bacia do córrego Botafogo.

Fonte: Romero *et al.* (2017)

A predominância de declividades inferiores a 7% contribui na recarga do aquífero, favorecendo a infiltração e o armazenamento das águas das chuvas (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 2016).

2.5. Geologia, Aspectos Climáticos e Fisiográficos 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 movimento e qualidade destas. 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, 2006).

Segundo a classificação climática de Köppen, existem três climas atuantes no estado de Goiás: 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). 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).

2.6. Geomorfologia e Solos da Bacia do Córrego Botafogo

Segundo Casseti (1992), o método de fotointerpretação de aerofotos em escala de 1:40.000 possibilitou a distinção de cinco unidades morfológicas no município de Goiânia, conforme Quadro 01.

Quadro 01 – Unidades Morfológicas do Município de Goiânia.

	Altitude (m)	Características Gerais	Subunidades	Região
Planalto Dissecado de Goiânia	920 a 950	Elevado grau de dissecção	Superfícies de Formas Aguçadas (declives superiores a 30%)	N e NE
		Forte gradiente	Superfícies de Formas Convexidas (declives inferiores a 20%)	Morro do Mendanha
Chapadões de Goiânia	860 a 900	Fluxo laminar, transporte de sedimentos, entulhamento	Superfície Aplainada	SO
		Fluxo laminar concentrado, ravinamentos, erosão, solos permeáveis	Superfícies Rampeadas	
Planalto Embutido de Goiânia	750 a 800	Impermeabilização solo, concentração de enxurradas.	Superfícies de Formas Convexas (declives suaves até 10% e moderados até 20%)	Entre o Planalto Dissecado e os Chapadões de Goiânia
		Apto à ocupação urbana	Superfícies de Formas Tabulares (declives até 10% predominando as áreas de declividade entre 0 e 5%)	
Terraços e Planícies da Bacia do Rio Meia Ponte	700 a 720	Fluxo laminar, cascalheiras sotopostas, sequências alúvio-coluvionares	Terraços Fluviais Suspensos	-----
		Sedimentos arenosos, sequências silto-argilosas, enchentes de verão	Planícies Fluviais de Inundação	Rio Meia-Ponte, Ribeirões João Leite, Anicuns e Capivara
Fundos de Vale	-	Erosão acelerada, ravinas ou voçorocas	Faixas de transição entre os processos com declives podendo ultrapassar 40%	Ao longo de toda a drenagem

Fonte: Modificado de Casseti (1992).

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, conforme o padrão de relevo, hipsometria, densidade de drenagem e tipos de coberturas de regolitos. 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 transferência das águas de precipitação para zonas mais profundas dos aquíferos. 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, 2006).

Identificam-se na macrozona de Goiânia domínios pedológicos do tipo Latossolo Vermelho Escuros (mapeados na porção norte da área), Latossolo de natureza areno-argiloso Vermelho-Amarelado a Amarelado (observados na porção sul da área); Litossolos e Gleissolos/podzólicos (solos aluviais do tipo glei, húmicos, encontrados, geralmente, ao longo do canal dos córregos que drenam esta macrozona) (GOIÂNIA, 2008).

O Latossolo Vermelho Escuro denominado Distrófico (LEd) é o domínio pedológico mapeado de ocorrência significativa na bacia do córrego Botafogo e se caracteriza por apresentar cor avermelhada, baixa fertilidade e composição férrica proveniente de ataque sulfúrico.

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).

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, 2006).

2.7. Hidrogeologia da Bacia do Córrego Botafogo

No Complexo Anápolis-Itaçu, ocorre o Aquífero Cristalino Sudeste – SACSE (SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO, 2006), com capacidade específica média de $0,15 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e vazão média de $4,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (Tabela 01).

Tabela 01 – Parâmetros Hidráulicos e Hidrogeológicos de Goiânia e Entorno.

Parâmetros Hidráulicos	SACSE	SAAX	
		Poroso	Fissural
Q (m^3/h)	4,5 a 6,0	16,5	5,1
Ss ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$)	0,15	3,5	1,5
K (m/s)	$8,8 \times 10^{-7}$		$1,9 \times 10^{-6}$
T (m/s)	$1,3 \times 10^{-4}$		$2,8 \times 10^{-4}$
Sy ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$)	0,183		0,587

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

Na região de Goiânia e entorno, as unidades aquíferas do Grupo Araxá (SAAX) se caracterizam, pela respectiva litologia, como aquífero poroso, com capacidade específica de até $3,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e vazão média dos poços de $16,5 \text{ m}^3/\text{h}$; ou fissural, com capacidade específica de até $1,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e vazão média dos poços de $5,1 \text{ m}^3/\text{h}$ (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 2016).

Litologicamente a bacia do Botafogo caracteriza-se, em maior área, por rochas do Grupo Araxá. Pequena porção ao norte da bacia é recoberta por areia, argila e cascalho (Figura 05).

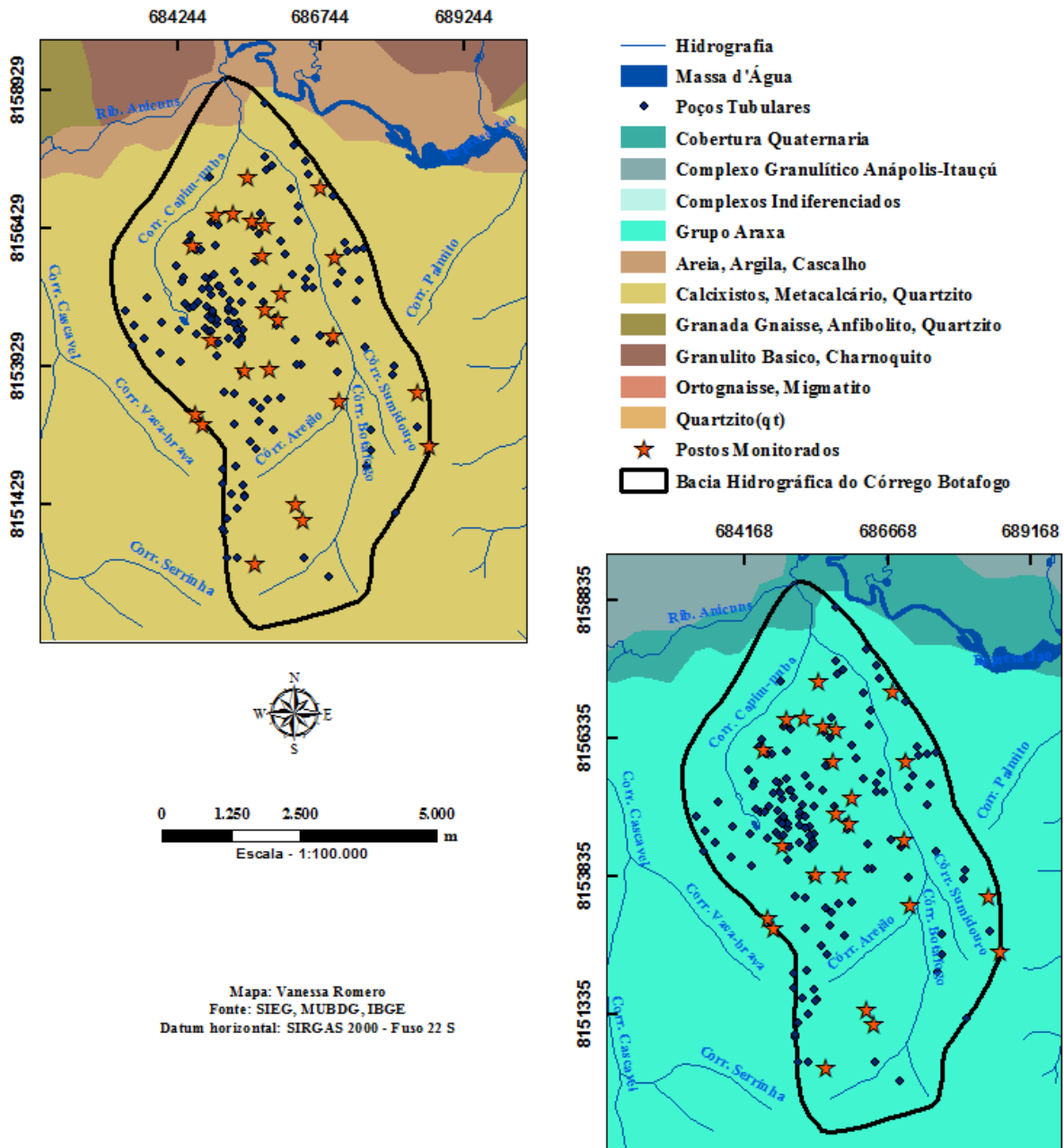


Figura 05 – Mapa hidrogeológico da bacia do córrego Botafogo.

Fonte: Elaborado pela autora com dados do SIEG (2014).

3. 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.

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. De 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.

3.1. 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 (ISAAKS e 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 e pentaesféricos. 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 γ 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 .

3.2. 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).

Para *krigagem* da carga hidráulica em toda a área da bacia do Botafogo utilizou-se a ferramenta *3 D Analyst Tools* do software da *ESRI, ArcGis*, visando estimar valores em células cujos valores não são conhecidos

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 e SEDGHAMIZ, 2008):

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

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

No cálculo da interpolação do valor de um ponto através do método da *krigagem ordinária*, onde a soma dos pesos é igual a um, equação (3), $Z^*(x_p)$ é o valor do ponto que se deseja interpolar; n é a quantidade de pontos amostrados cujos valores serão usados na interpolação do ponto x ; $Z(x_i)$ é o valor do ponto amostrado; e λ_i é o valor do peso do valor de $Z(x_i)$ sobre o ponto x (MARCUIZZO et al., 2012). Para os casos em que o processo estocástico não é estacionário, ou seja, o processo apresenta uma tendência, Ahmadi e Sedghamiz (2008) 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 ;

λ_i é o peso associado aos dados;

μ 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 .

3.3. Monitoramento da Superfície Piezométrica

O monitoramento em águas subterrâneas engloba coleta, armazenamento, análise e interpretação de dados que contribuem para avaliação da variação temporal e espacial da reserva da água do aquífero (MESTRINHO, 2008). A medição da superfície piezométrica na bacia do córrego Botafogo foi realizada com medidor elétrico, que possui um sensor que dispara uma sirene ao tocar na superfície da água (Figura 06) e o levantamento planialtimétrico da área, realizado com o *GPS geodésico RTK Trimble R6* que integra um receptor de estação base (Figura 07, foto da esquerda) e um Rover (Figura 07, foto da direita).



Figura 06 – Instrumento de medição de nível.
Fonte: Autoria Própria. Instrumento disponível no Lab. de Hidráulica da UFG-Campus I (13/04/2016).



Figura 07 – GPS RTK Trimble R6.
Fonte: Autoria Própria. Instrumento disponível no Lab. de Hidráulica da UFG-Campus I (24//07/2017).

A coleta dos dados de nível de água subterrânea da rede de monitoramento foi realizada mensalmente entre maio/2016 e junho/2017

(Quadro 02) de modo a constituir acervo hidrológico que possibilitasse estimar tendências através de análise estatística (ALLEY e TAYLLOR, 2001).

Quadro 02 – Profundidade do lençol freático na Bacia Hidrográfica do Córrego Botafogo.

Coordenadas UTM (m)			PM	Profundidade do Lençol Freático (m)													
X	Y	Z		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 da autora. Nota: coordenadas em negrito constituem resultados de interpolação; colunas na cor rosa representam o período seco; em azul representam o período chuvoso; NC indica dado não coletado; dados em vermelho indicam profundidade em que o poço encontrava-se seco.

4. 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 piezométrica do período seco, correspondente ao mês de junho/2016 apresentando carga piezométrica máxima equivalente a 841m. Nos meses secos de maio e junho de 2017, os poços D e E encontravam-se secos apresentando cargas piezométricas equivalentes a 745m e 801m, respectivamente (Figura 08).

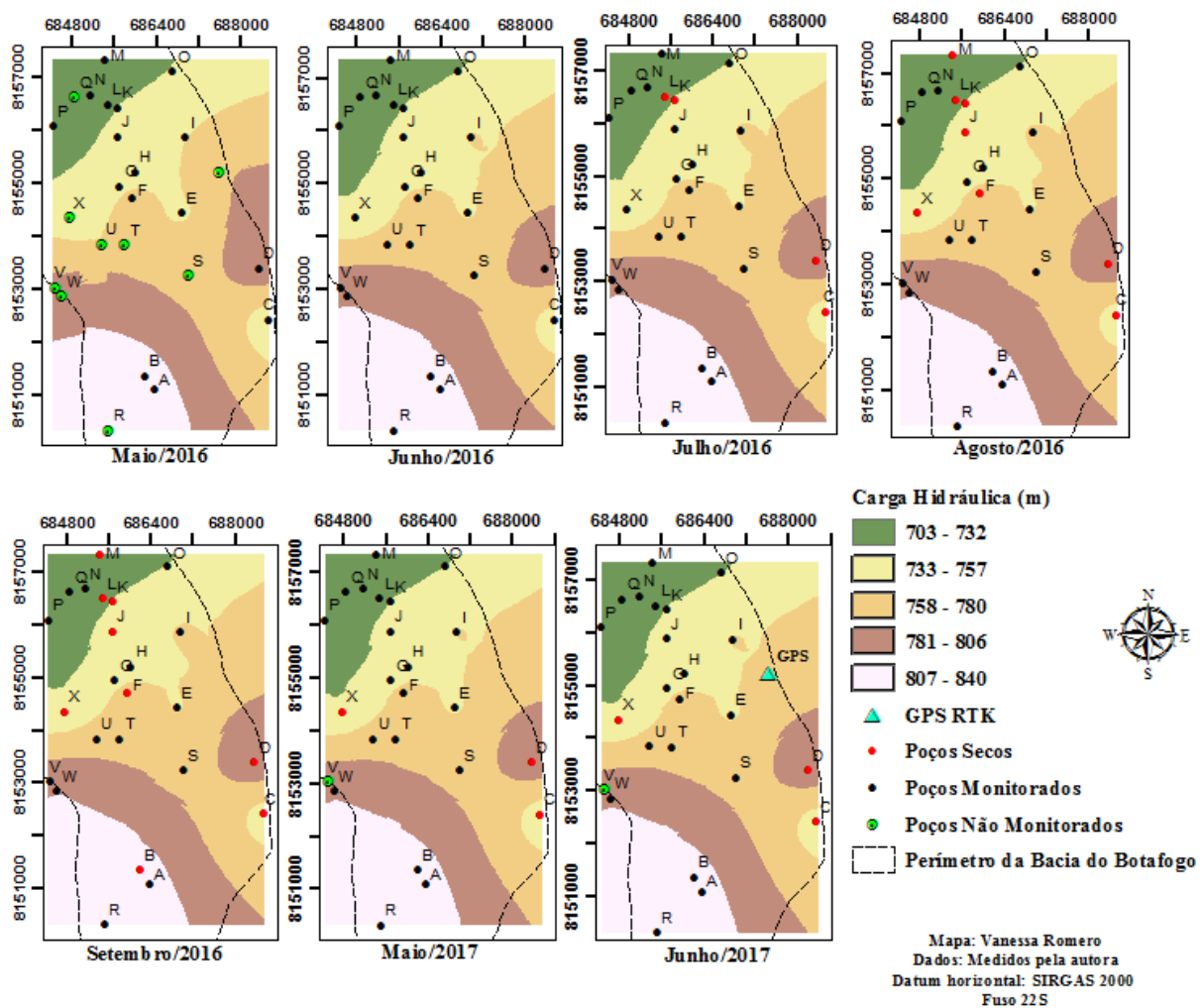


Figura 08 – Distribuição das cargas piezométricas na bacia do Botafogo no período seco do ano de 2016 e nos meses secos de maio e junho do ano de 2017.

Fonte: Elaborado pela autora com dados próprios.

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 na cota piezométrica de 11,20m o poço encontrava-se seco (Quadro 2). A carga piezométrica média do PM – J foi de 745m (Figura 8).

Durante os meses de julho, agosto e setembro de 2016 do período seco, o poço C apresentou carga piezométrica média de 745m (Figura 8) e nível piezométrico de 13,40m (Quadro 2). De modo análogo, o PM

– C esteve seco em outubro, novembro e dezembro de 2016, meses chuvosos (Figura 9), apresentando nível d'água de janeiro a abril de 2017 (Quadro 2), 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 abril de 2017 enquanto que o PM - T não apresentou nível d'água no mês de novembro/2016.

O nível piezométrico 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 piezométrica de 736m.

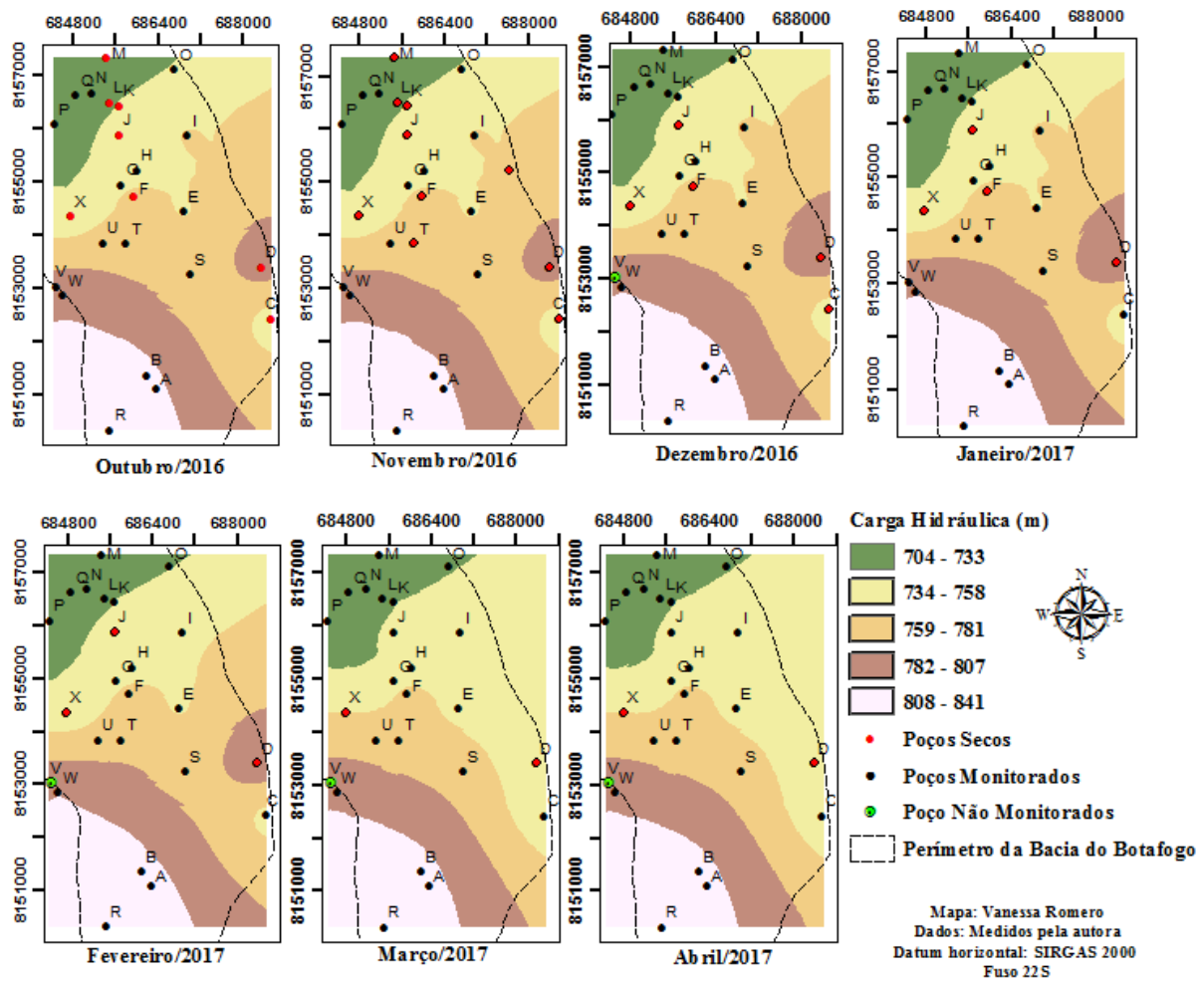


Figura 09 – Distribuição das cargas piezométricas na bacia do Botafogo no período chuvoso (outubro/2016 a abril/2017).

Fonte: Elaborado pela autora com dados próprios.

Salienta-se que o poço M, situado na região norte da bacia do Botafogo, apresentou a menor carga piezométrica do intervalo de tempo contemplado pelo estudo, correspondente a 706m, entre os meses de julho/2016 e janeiro/2017 (Figuras 08 e 09), período em que se encontrava seco, na cota piezométrica de 7,65m (Quadro 02).

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. 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. O poço PM - F esteve seco de outubro de 2016 a janeiro de 2017.

5. 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.

De modo análogo, o 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 na cota piezométrica de 11,20m o poço encontrava-se seco. Em relação à superfície piezométrica, 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. Em contrapartida, ao longo de todo o período chuvoso, os poços D e X estiveram secos.

Guerra e Teixeira Guerra (2008) definem a bacia hidrográfica como uma rede dinâmica, drenada pelo rio principal e seus subafluentes, cuja água escoar dos pontos mais altos para os mais baixos, e cuja área sofre modificações sob efeito de degradação ambiental.

Perante este conceito, e considerando que a quantidade de água subterrânea pode variar conforme as características de eventos de chuva (duração e intensidade), bem como em virtude das características físicas, hidrogeológicas e de variáveis como pressão atmosférica, conclui-se que as variações do nível da superfície piezométrica observadas especialmente nos poços de monitoramento situados à jusante da bacia do Botafogo estão relacionadas à maior quantidade de poços tubulares instalados, exigindo 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.

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.

6. 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.
- ALLEY, W. M.; TAYLOR, C. J. **The value of long-term groundwater level monitoring**. *Groundwater*, v. 39, n. 6, p. 801-802, 2001.
- BERVEGLIERI, Adilson; MENEGUETTE, M.; PITERI, Marco Antônio. Aplicação do interpolador krigagem em modelos digitais de terrenos, comparando-se os casos de isotropia e anisotropia. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 7222-7229, 2011.
- CAMARGO, Eduardo Celso Gerbi. Geoestatística: fundamentos e aplicações. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos: INPE, 1998.
- _____.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. **Análise espacial de superfícies**. Brasília: Embrapa, 2004.
- CASSETI, V. Geomorfologia do município de Goiânia. **Bol. Goiano Geografia.**, Ed. UFG, Goiânia, 12(1): 64-85. vol. 12 – Nº 1, 1992.
- DESBARATS, A. J.; LOGAN, C. E.; HINTON, M. J.; SHARPE, D. R. On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model. **Journal of Hydrology**, v. 255, n. 1, p. 25-38, jan. 2002.
- GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. Novo dicionário geológico-geomorfológico, 6ª Ed.– Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008, p. 652.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. An Introduction to Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.
- KUMAR, S.; SONDHIL, 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, Paulo M. Barbosa. Análise estatística de dados geológicos. 2. ed. São Paulo: Unesp, 2003. 253 p.
- 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. **II Simpósio Internacional Caminhos Atuais da Cartografia na Geografia, São Paulo. São Paulo: EDUSP**, v. 1, p. 128-128, 2010.
- 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. CPRM/LABHID, Rio de Janeiro, 2008. p. 673-686.
- _____.; ANDRADE, L.; MELO, D. 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.
- MATHERON, Georges. Principles of Geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, n. 8, p. 1246-1266, 1963.
- NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José de Andrade. **Hidrologia estatística**. CPRM, 2007.
- NIKROO, L.; KOMPANI-ZARE, M.; SEPASKHAH, A. R.; SHAMSI, S. R. F. 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.

GOIÂNIA. Prefeitura Municipal de Goiânia. **Diagnóstico ambiental da sub-bacia do córrego Botafogo**. Agência Municipal de Meio Ambiente – AMMA – GO. 2008.

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.

DE 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 de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo: 2016.

SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO (Goiás). Superintendência de Geologia e Mineração. **Hidrogeologia do estado de Goiás e Distrito Federal**. Goiânia, 2006. 236 p. (Série Manuais).

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM (Brasil). Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Unidades Aquíferas no Município De Goiânia/GO e Entorno**. Goiânia, 2016. 58 p. (Série Manuais).

UHLEIN, A.; FONSECA, M.A.; SEER, H.J.; DARDENNE, M.A. 2012. 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. **Oficina de Textos: So Paulo, SP, Brasil**, 2015.

CAPÍTULO II

MODELAGEM DA SUPERFÍCIE PIEZOMÉTRICA NA BACIA DO CÓRREGO BOTAFOGO – GOIÂNIA/GO

MODELING OF THE PIEZOMETRIC SURFACE IN THE BOTAFOGO WATERSHED – GOIÂNIA/GO

RESUMO

Frente à intensificação do uso das águas subterrâneas para abastecimento humano, industrial e agrícola, este artigo avalia a dinâmica das águas subterrâneas na bacia hidrográfica do córrego Botafogo em Goiânia/Goiás, através da modelagem matemática do aquífero livre, utilizando dados do nível do lençol freático, medidos no período de seca e chuva dentre maio/2016 e junho/2017. A condição de contorno de carga hidráulica definida no modelo permanente da bacia foi de fluxo local, ou seja, as cargas hidráulicas observadas foram utilizadas como condição inicial possibilitando a estimativa da recarga e o cálculo da vazão de saída (18.646 m³/dia). A calibração dos parâmetros hidrodinâmicos da bacia aconteceu em duas etapas. O escoamento na bacia foi simulado em regime transiente através da calibração dos parâmetros armazenamento específico (Ss) e rendimento específico (Sy). Na zona de montante da bacia do Botafogo, a condutividade hidráulica calibrada foi 0,01 m/dia. Na zona central, em torno de 0,9 m/dia e na zona de jusante, 50 m/dia. A modelagem do armazenamento específico da bacia de estudo permitiu concluir que o comportamento oscilante do lençol freático, reflete-se também na variação da carga hidráulica.

Palavras-chave: Escoamento de Base, Nível d'água, Recarga Aquífera.

ABSTRACT

Front of the intensification of groundwater use for human, industrial and agricultural supply, this article evaluates the groundwater dynamics in the Botafogo stream basin in Goiânia/Goiás, through the mathematical modeling of the free aquifer, using data from the groundwater level, measured in the period of drought and rain between May/2016 and June/2017. The hydraulic load contour condition defined in the permanent model of the basin was local flow, that is, the observed hydraulic loads were used as initial condition allowing the estimation of the recharge and the calculation of the outflow (18.646 m³/day). Calibration of hydrodynamic parameters of the basin occurred in two stages. The flow in the basin was simulated in a transient regime through the calibration of the specific storage parameters (Ss) and specific yield (Sy). In the upstream zone of the Botafogo basin, the calibrated hydraulic conductivity was 0.01 m/day. In central zone, around 0.9 m/day and in downstream zone, 50 m/day. The modeling of specific storage of the basin of study allowed to conclude that the oscillating behavior of the water table is also reflected in the variation of the hydraulic load.

Keywords: Baseflow, Water Table, Aquifer Recharge.

1. INTRODUÇÃO

A exploração desordenada dos recursos naturais, somada ao desmatamento e uso indiscriminado de corretivos, agrotóxicos e fertilizantes em atividades agrícolas, comprometem a qualidade e a quantidade de água drenada por uma bacia hidrográfica (PINTO *et al.*, 2004), requerendo, portanto, a compreensão do fluxo subterrâneo para melhor gestão do sistema aquífero.

Nesse sentido, partindo da premissa que a água é um recurso limitado, o cenário atual de disponibilidade *versus* demanda de água requer buscas legais por soluções de disponibilidade de água para consumo (GETIRANA, 2015).

Frente à intensificação do uso das águas subterrâneas para abastecimento humano, industrial e agrícola, a modelagem numérica representa destaque na gestão dos recursos hídricos, uma vez que permite o entendimento do sistema hidrogeológico (WOTTRICH, 2012) através da avaliação do comportamento dos aquíferos perante extremos climáticos ou intervenções antrópicas, no intuito de simular a dinâmica das águas mediante alterações nos padrões de precipitação e recarga, auxiliando na projeção de cenários futuros (BEDIENT *et al.*, 1994).

Os métodos para estimativa de recarga concentram-se em revisões detalhadas dos princípios e práticas do melhor método, dados disponíveis, característica da área, escalas temporais e espaciais, incluindo métodos de Separação de Escoamento de Base e Variação dos Níveis d'Água (MATTIUZI *et al.*, 2015).

Segundo Rushton (2003), a flutuação do aquífero livre pode ser simulada através de modelos matemáticos utilizando dados de nível do lençol freático e rendimento específico (S_y), levando-se em conta que o escoamento ocorre durante períodos de chuvas intensas devido à intensidade da precipitação e capacidade de infiltração no solo.

A modelagem computacional do fluxo é amplamente difundida através da utilização de modelos estocásticos, que se baseiam na teoria das probabilidades (WOTTRICH, 2012) ou modelos determinísticos, que assumem que o estágio ou reações futuras de um sistema aquífero estudado, são predeterminados por leis físicas do escoamento de água subterrânea (KRESIC, 1997).

Considerando os aspectos quantitativos de água subterrânea, o *MODFLOW* é um modelo matemático tridimensional criado para fornecer informações sobre o estado e evolução das reservas de águas subterrâneas, bem como do potencial de

recarga dos aquíferos, contribuindo para o adequado gerenciamento dos recursos hídricos através da determinação das propriedades hidráulicas dos aquíferos (MCDONALD; HARBAUGH, 1988).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a dinâmica das águas subterrâneas na bacia hidrográfica do córrego Botafogo, em Goiânia/GO, através de modelagem matemática para a determinação das propriedades hidráulicas do aquífero livre da bacia. O estudo considerou um reduzido número de dados de carga hidráulica observada, propondo e executando soluções para suprir a deficiência de dados para modelagem.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

Segundo estudo hidromorfológico realizado na bacia do Botafogo, o córrego Botafogo está inserido na bacia do Ribeirão Anicuns e é o principal corpo hídrico da sub-bacia de estudo, cuja área contempla a região norte e central do município de Goiânia/GO e, pequena porção (ao sul da bacia), do município de Aparecida de Goiânia/GO. O município de Goiânia, conforme classificação climática de *Köppen*, encontra-se em uma região de clima tropical com estação seca no inverno (Aw), marcada por um período chuvoso (de outubro a abril) e um período seco (de maio a setembro) (ROMERO *et al.*, 2017).

Os domínios pedológicos identificados na macrozona de Goiânia são Latossolos, Litossolos e Gleissolos (Figura 01) caracterizando-se por relevos de típicos do Planalto Central Goiano, esculpidos nos terrenos granulíticos, parcialmente recobertos por latossolos vermelhos, profundos, de textura argilosa e declividades entre 0 e 5% (GOIÂNIA, 2008).

A bacia objeto do estudo é caracterizada por Romero *et al.* (2017) como urbana, com pequenas porções de vegetação remanescente, 174 poços tubulares instalados devidamente cadastrados e/ou outorgados, além de 3 subestações de energia e 8 parques.

Do ponto de vista de recarga e circulação de água subterrânea neste compartimento, ocorrem sistemas de fluxos locais, pois o relevo mais dissecado resulta na dispersão do fluxo superficial e subterrâneo e, neste caso, a recarga é pouco eficiente (SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO, 2006).

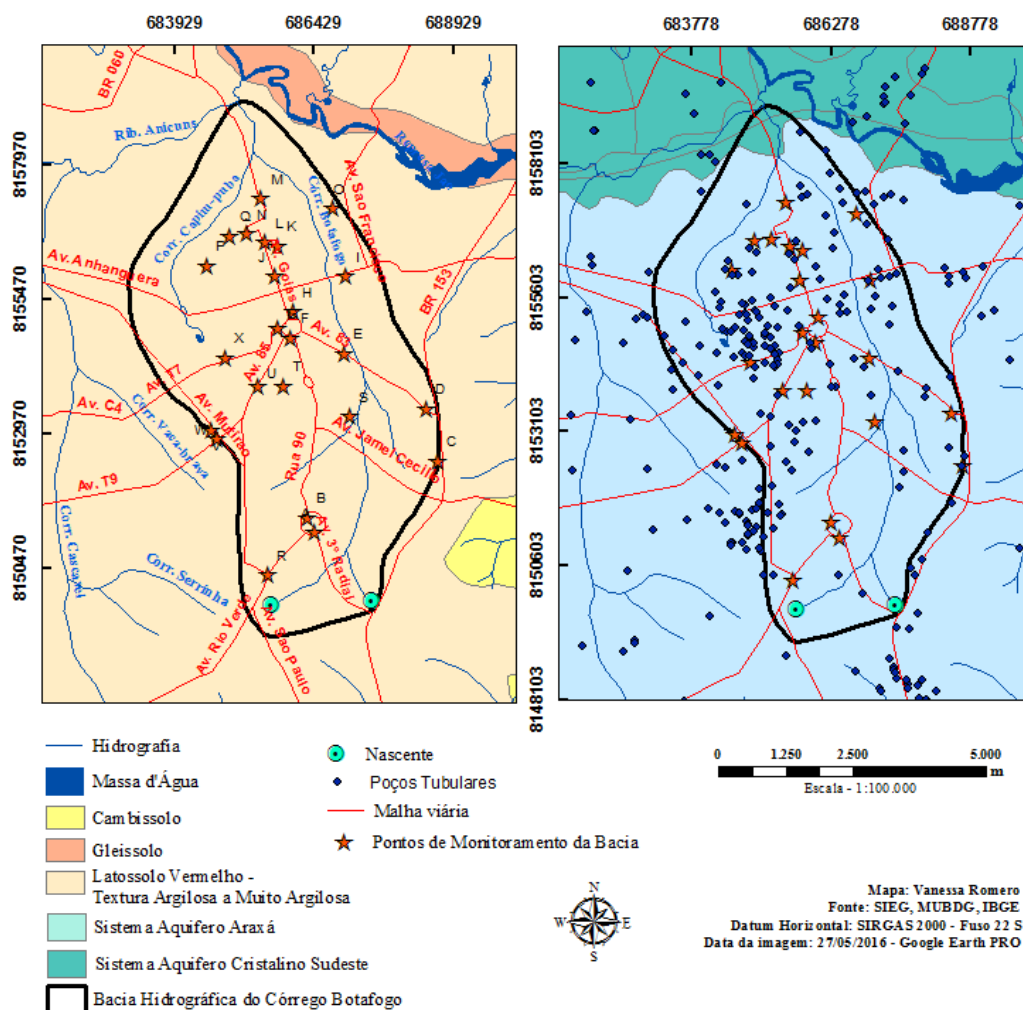


Figura 01 – Solos e hidrogeologia da bacia do córrego Botafogo.

Fonte: Elaborado pela autora com dados do SIEG (2014), do MUBDG (2014) e próprios (2017).

De acordo com o mapeamento geomorfológico do Projeto Radambrasil, a área da bacia do Botafogo se insere na subunidade geomorfológica Planalto Rebaixado de Goiânia que se caracteriza como um vasto planalto rebaixado e dissecado, esculpido na área em metassedimentos (MAMEDE *et al.*, 1983). Ademais, conforme o Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – Carta Geológica, Folha Goiânia - SE. 22, escala 1 : 100.000, o substrato rochoso da bacia, pertence a Unidade B do Grupo Araxá (LACERDA FILHO *et al.*, 1999).

Na área de ocorrência de rochas pertencentes ao Grupo Araxá há dois tipos de aquíferos que se distinguem pela sua natureza fissural e/ou porosa, representando aquíferos descontínuos, livres, anisotrópicos, com condutividade hidráulica média muito baixa (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 2016):

- Os tipos porosos são aquíferos livres, de maior potencialidade em Goiânia e entorno, muito suscetíveis à contaminação, são influenciados pelas variações

climáticas sazonais, apresentando flutuações do nível freático. Ademais, estes aquíferos funcionam como filtros, favorecem a recarga dos aquíferos sotopostos e regularizam a vazão de base das drenagens superficiais nos períodos de recessão de precipitações pluviométricas.]

- O aquífero fraturado é caracterizado pela inexistência ou presença muito reduzida de espaços intergranulares na rocha, responsável pelo armazenamento e transmissão de água.

2.2. Monitoramento do Nível Freático na Bacia de Estudo

A relação dinâmica entre a precipitação e os níveis do lençol, em Hidrogeologia, constitui o mecanismo pelo qual a água entra e sai do sistema, podendo ser por meio de poços, drenagens subterrâneas, recarga, rios, lagos, evapotranspiração, carga hidráulica (ANDERSON e WOESSNER, 1992).

Abordou-se uma aplicação conjunta da água que infiltra no aquífero e da flutuação do lençol freático, nesta pesquisa, de maneira que a recarga foi considerada como o valor médio da chuva que cai sobre a área da bacia, considerando-se duas zonas: uma permeável e outra impermeável (Figura 02).

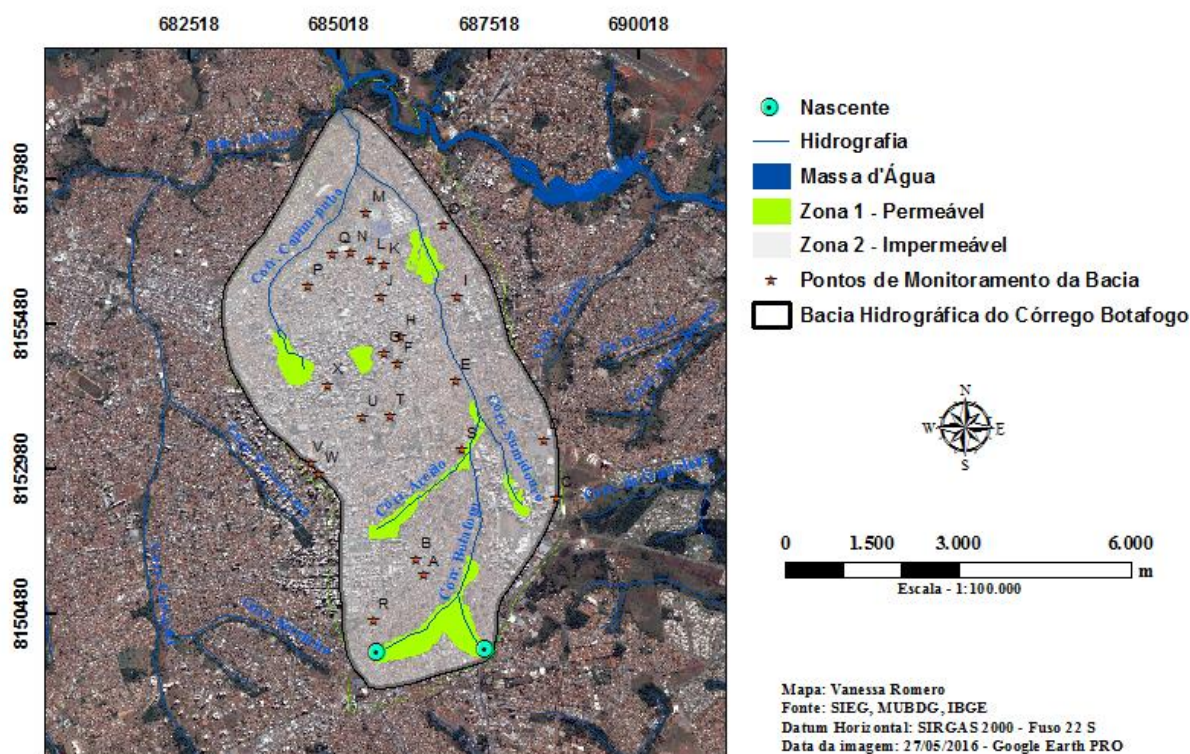


Figura 02 – Zonas de recarga na bacia do córrego Botafogo.

Fonte: Elaborado pela autora com dados do SIEG (2014), do MUBDG (2014) e próprios (2017).

A precipitação total no período correspondente a 14 meses monitorados na área da bacia foi de 1.290,30 mm, registrada diariamente por 10 pluviógrafos instalados na região (Quadro 01).

Quadro 01 – Recarga na bacia do Botafogo no período de mai/2016 a jun/2017.

Dia	Zona 1	Zona 2
	m/dia	mm/dia
0	0.0006420	0.0000642
1	0.0006420	0.0000642
31	0.0000110	0.0000011
61	0.0000010	0.0000001
92	0.0003190	0.0000319
123	0.0005540	0.0000554
153	0.0058110	0.0005811
184	0.0027160	0.0002716
214	0.0042930	0.0004293
245	0.0055500	0.0005550
276	0.0049760	0.0004976
304	0.0054180	0.0005418
335	0.0036650	0.0003665
365	0.0009520	0.0000952
396	0.0000000	0.0000000

A estimativa da recarga no lençol freático da bacia do Botafogo foi realizada a partir da modelagem dos dados de níveis dos poços de monitoramento *A*, *E*, *N* e *P* (Quadro 02) no período estudado, e considerando-se que a elevação nos níveis de água subterrânea no aquífero livre da bacia do córrego Botafogo ocorreu devido à recarga aquífera que atingiu a superfície piezométrica (HEALY e COOK, 2002).

Quadro 02 – Nível Piezométrico observado nos poços monitorados da bacia do córrego Botafogo.

Coordenadas UTM (m)			PM	Nível Piezométrico do Lençol Freático (m)													
				2016						2017							
X	Y	Z		mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun
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
686922	8154457	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
685174	8156696	724	N	7,60	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
684460	8156102	724	P	9,30	9,60	9,25	10,24	10,60	10,67	10,65	10,33	10,40	10,03	9,72	9,67	9,56	9,87

Fonte: Elaborado pela autora com dados do SIEG (2014).

Nota: colunas na cor rosa representam o período seco; em azul representam o período chuvoso.

2.3. Construção do Modelo Conceitual

2.3.1. Condições de Contorno e Topografia da Bacia do Botafogo

Para representação de um fenômeno físico por modelagem é necessário definir condições iniciais e de contorno, parâmetros hidrodinâmicos, condições de recarga e de descarga, além de definir os mecanismos que governam o fluxo do local (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

Para este estudo definiu-se como condição de contorno o divisor de águas topográfico que divide a porção de escoamento superficial, ou seja, o próprio limite da bacia hidrográfica do córrego Botafogo, levando-se em consideração um divisor freático que divide a porção de água subterrânea.

A inter-relação entre as águas superficiais e águas subterrâneas é muito intensa e não pode ser ignorada, uma vez que os divisores de água superficial e os divisores do escoamento subterrâneo não são coincidentes requerendo a identificação do comportamento da superfície de equilíbrio de água subterrânea em escala regional, ou seja, admissão de uma condição de contorno de carga conhecida baseada no fluxo regional, considerando-se que a água não fica contida somente na bacia, uma vez que os divisores topográfico e subterrâneo não coincidem, acarretando fuga de água de uma bacia para outra (FAN *et al.*, 2014).

Nesta pesquisa admitiu-se uma condição de contorno de fluxo zero, considerando-se que a carga hidráulica é sempre igual na modelagem estacionária no nível raso da bacia.

Após definida a condição de contorno da modelagem a etapa seguinte foi selecionar os poços de monitoramento cujas cargas hidráulicas observadas foram utilizadas como condição inicial na calibração do modelo (Figuras 03 a 10).

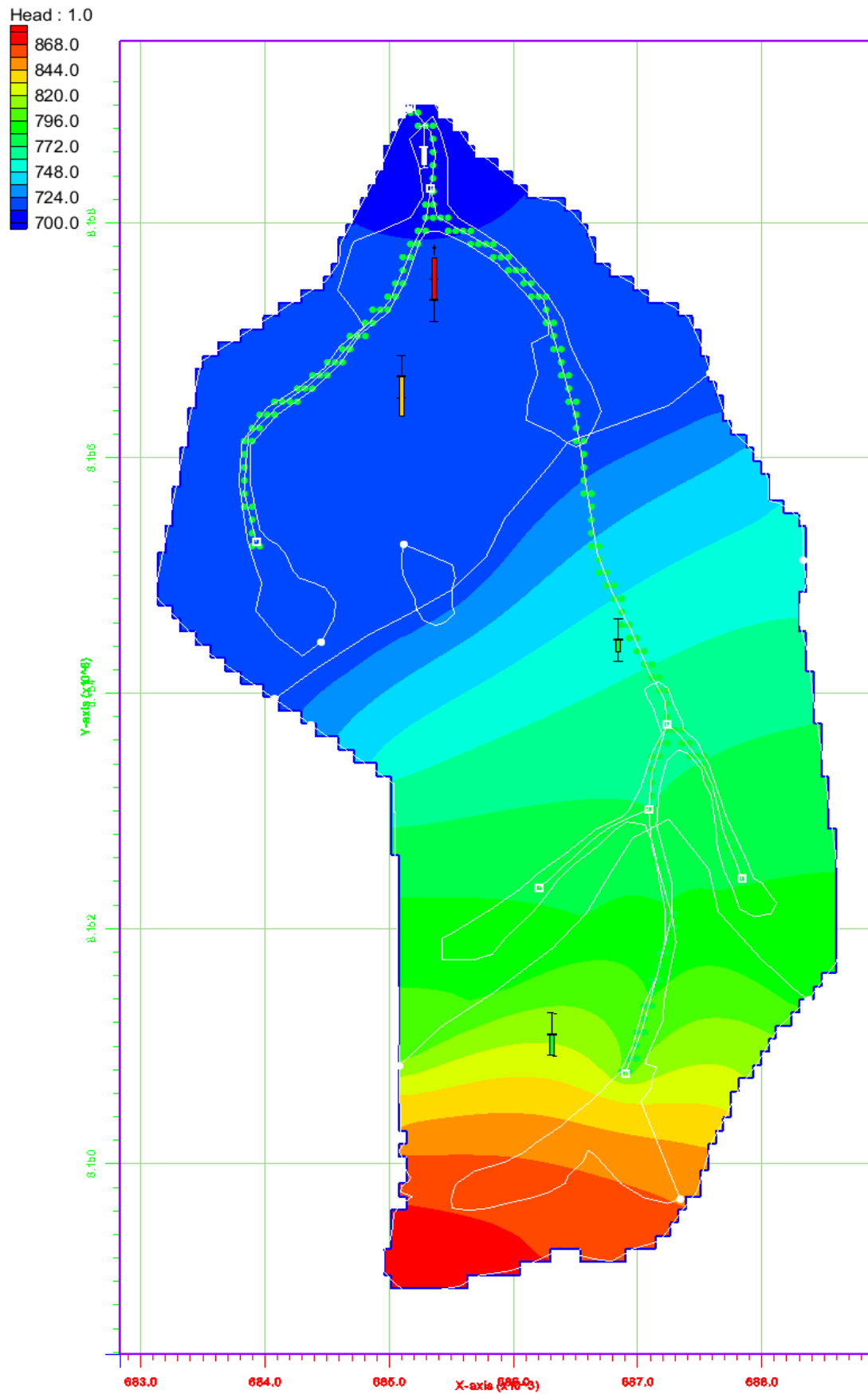


Figura 03 - Modelo Transiente Simulado para Calibração da Condutividade Hidráulica na área da bacia do córrego Botafogo no intervalo de tempo 1 dia.

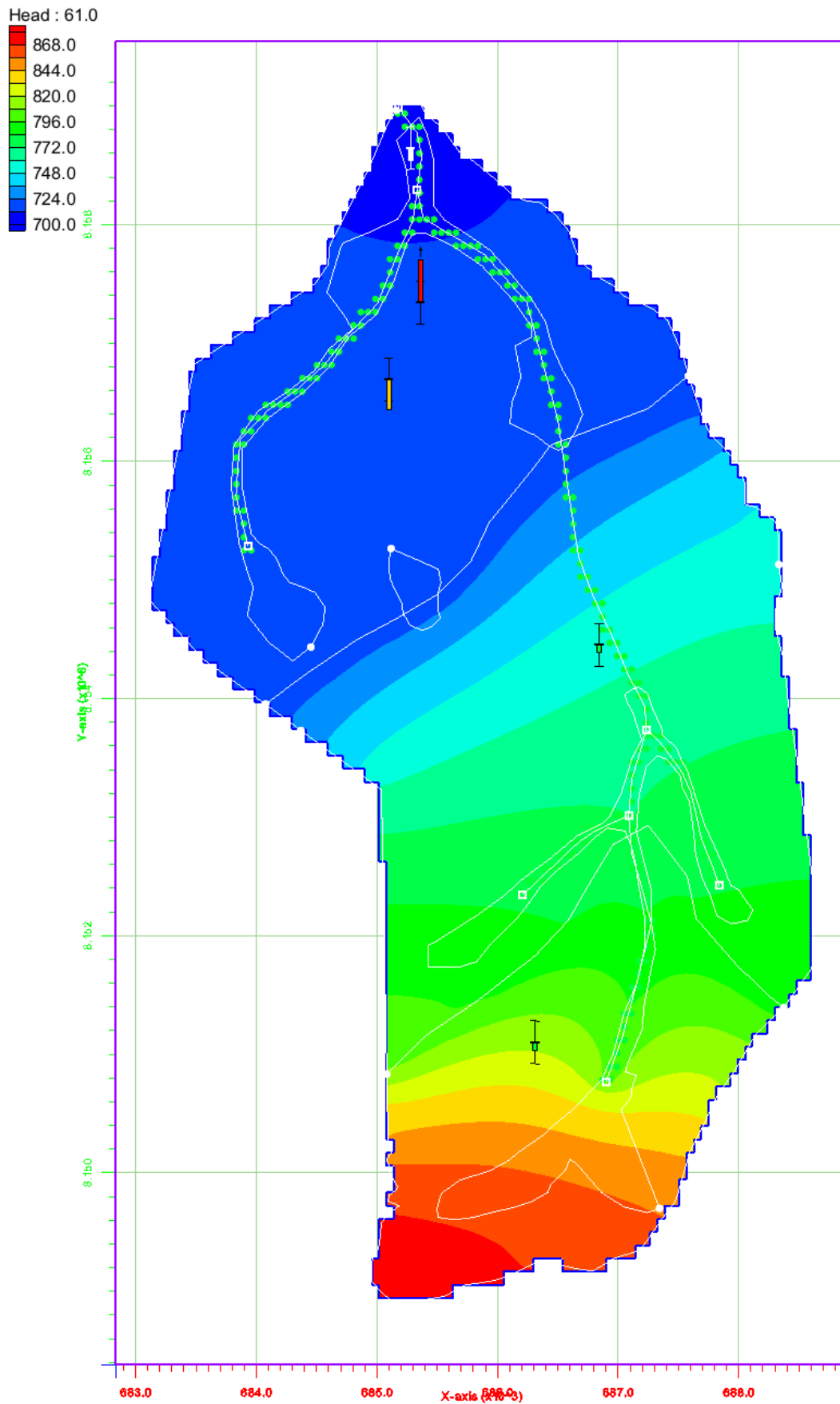


Figura 04 - Modelo Transiente Simulado para Calibração da Condutividade Hidráulica na área da bacia do córrego Botafogo no intervalo de tempo 61dias.

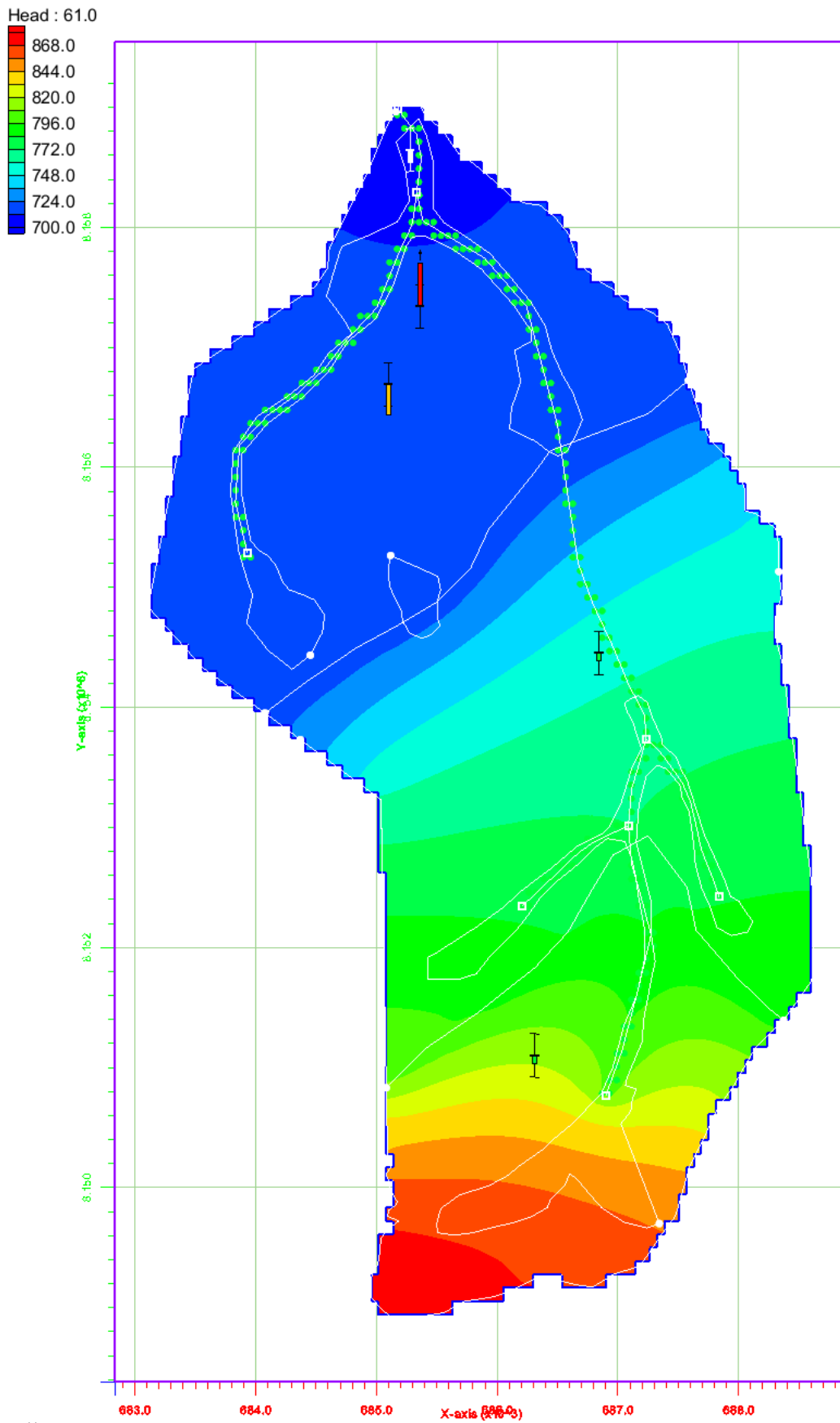


Figura 05 - Modelo Transiente Simulado para Calibração da Condutividade Hidráulica na área da bacia do córrego Botafogo no intervalo de tempo 123 dias.

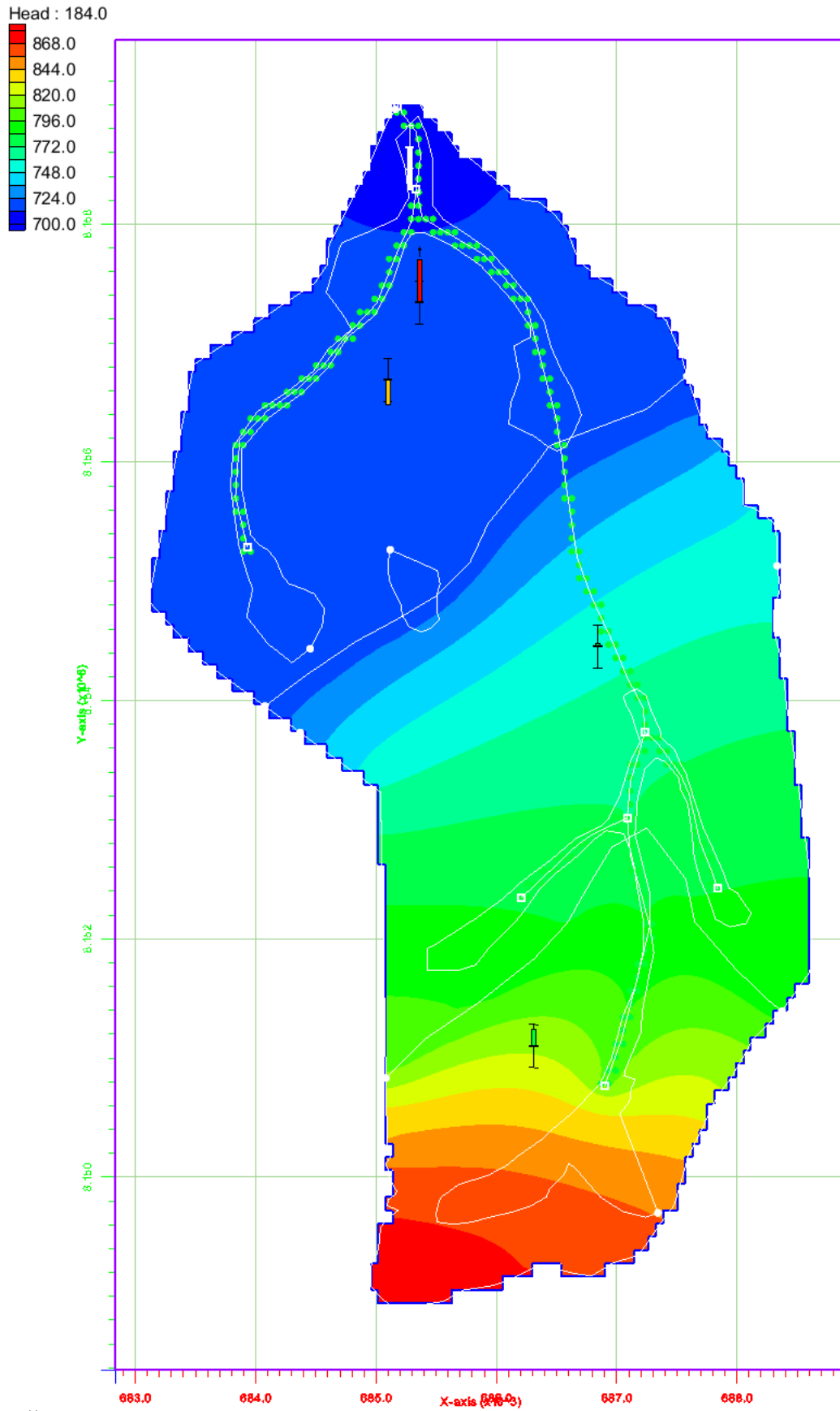


Figura 06 - Modelo Transiente Simulado para Calibração da Condutividade Hidráulica na área da bacia do córrego Botafogo no intervalo de tempo 184 dias.

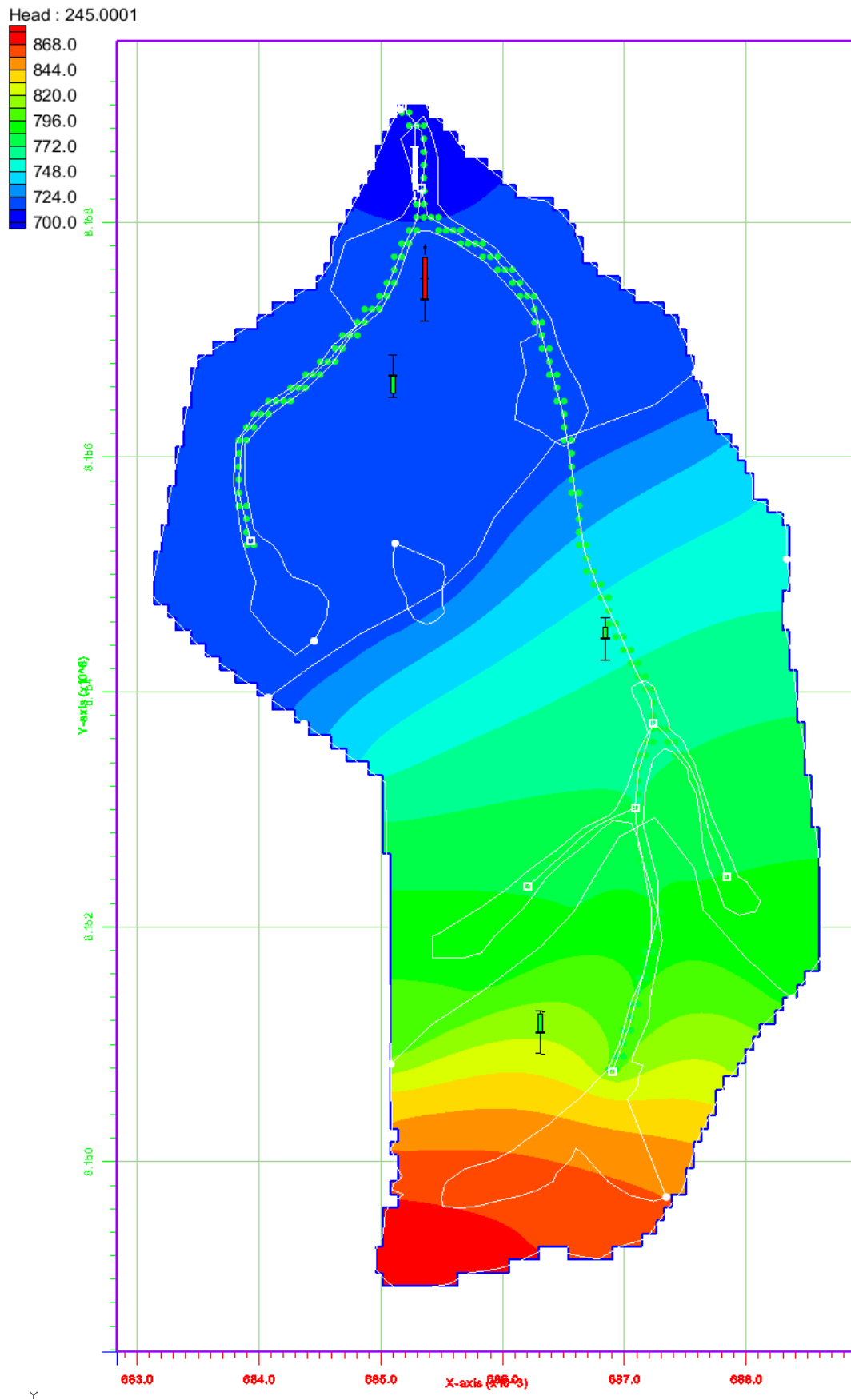


Figura 07 - Modelo Transiente Simulado para Calibração da Condutividade Hidráulica na área da bacia do córrego Botafogo no intervalo de tempo 245 dias.

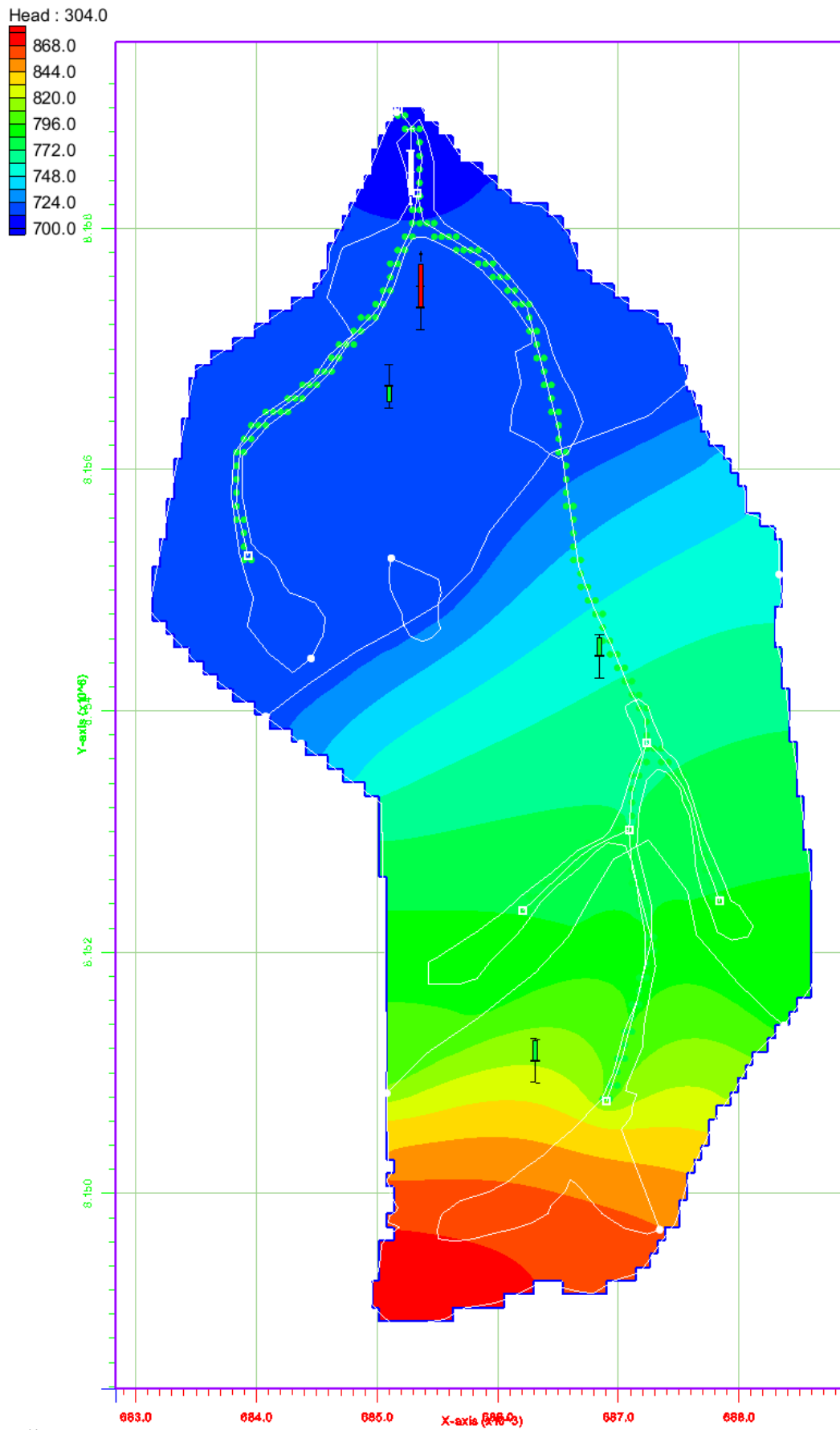


Figura 08 - Modelo Transiente Simulado para Calibração da Condutividade Hidráulica na área da bacia do córrego Botafogo no intervalo de tempo 304 dias.

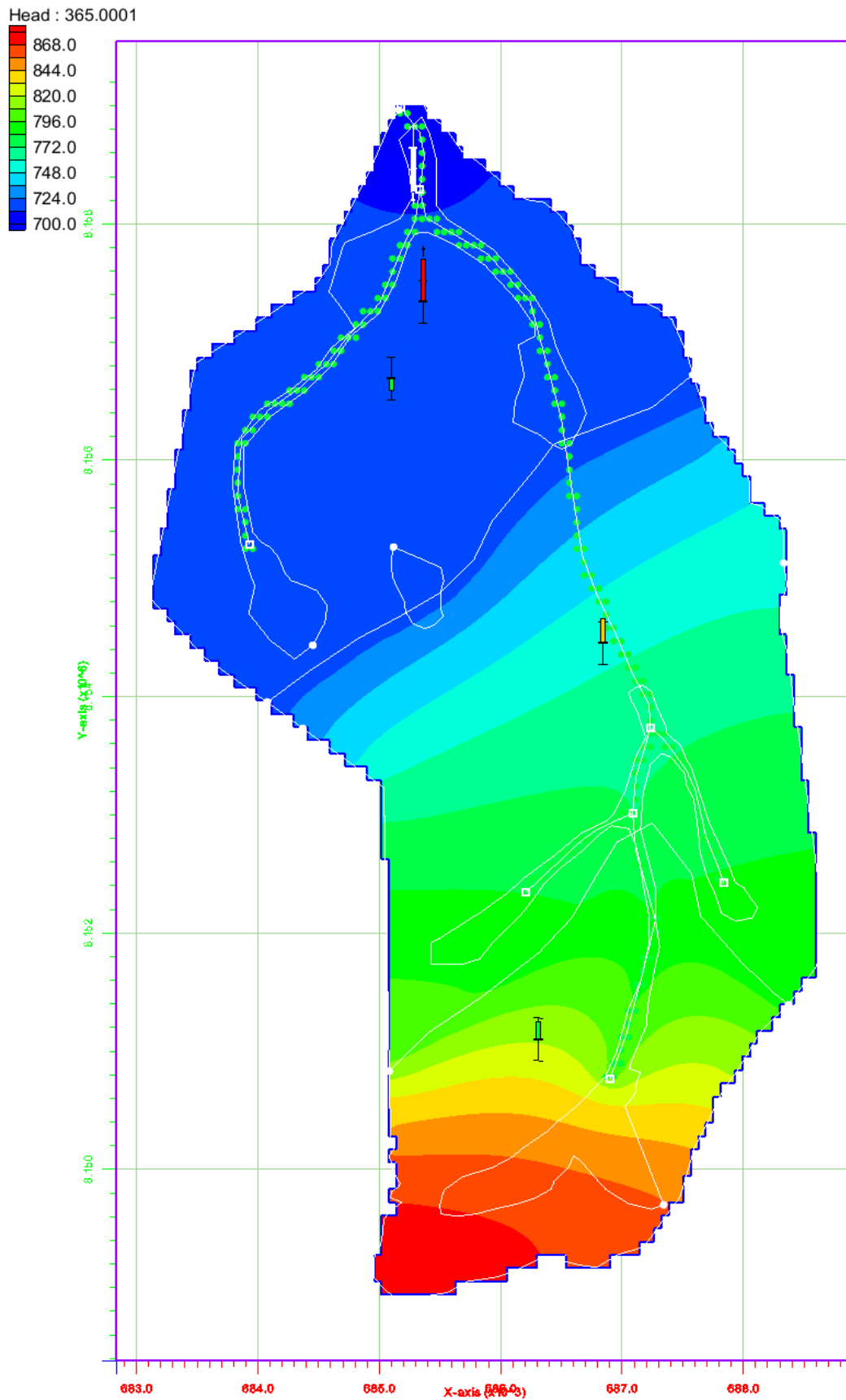


Figura 09 - Modelo Transiente Simulado para Calibração da Condutividade Hidráulica na área da bacia do córrego Botafogo no intervalo de tempo 365 dias.

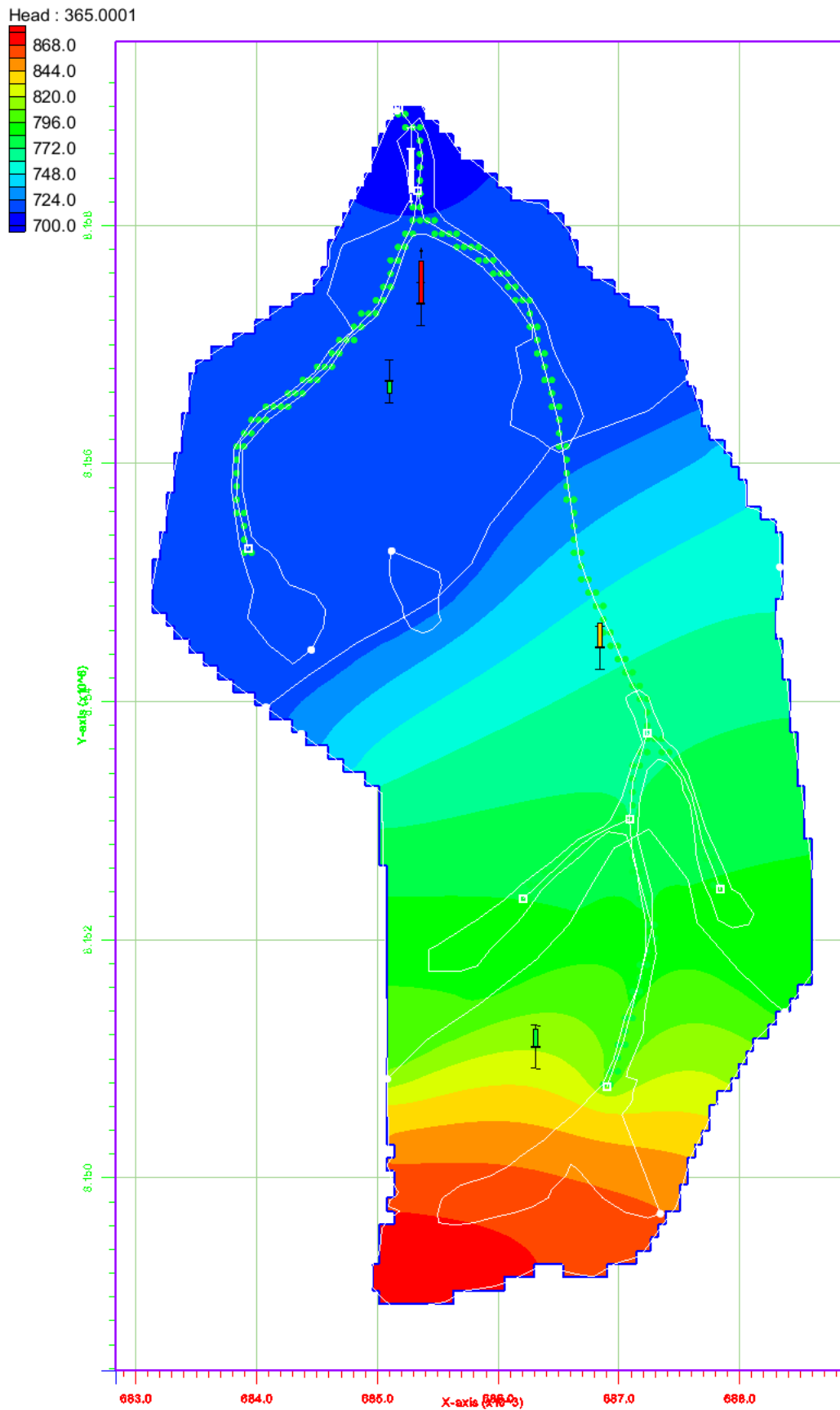


Figura 10 - Modelo Transiente Simulado para Calibração da Condutividade Hidráulica na área da bacia do córrego Botafogo no intervalo de tempo 396 dias.

As cotas topográficas dos poços foram medidas através do instrumento *GPS geodésico RTK Trimble R6*, auxiliando no cálculo das cargas hidráulicas iniciais (Tabela 01). O preenchimento das falhas/lacunas de cargas piezométricas foi realizado por *krigagem*, através da importação de uma tabela com as coordenadas dos poços para o programa *ArcGIS*, dentro do qual foi gerado um *shapefile* com os respectivos pontos, que, posteriormente, foi transformado em dado *raster*, com a representação das cargas observadas na área de estudo e, conseqüentemente, inferência das cargas que não foram calculadas.

Tabela 01 – Carga piezométrica dos poços monitorados na bacia do córrego Botafogo no período compreendido entre maio/2016 e junho/2017.

	Coordenadas UTM (m)			Carga Hidráulica (m)													
	X	Y	Z	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
A	686388	8151105	826	817	817	817	816	816	816	816	816	816	824	817	817	817	817
E	686915	8154445	763	756	756	755	755	755	755	755	755	755	761	756	756	756	755
N	685174	8156696	724	717	716	716	716	716	716	716	717	716	722	717	717	717	717
P	684460	8156102	724	715	715	715	714	714	714	714	714	714	722	715	715	715	714

2.4. Modelo matemático e o processo de calibração

Os modelos constituem instrumentos que atuam na representação dos processos de uma bacia hidrográfica a partir da inserção, calibração e validação de dados classificando-se de acordo com o tipo de variável utilizada na modelagem, podendo ser empírico (experimental), probabilístico (estocástico), ou determinístico dependendo da natureza das equações utilizadas (RENNÓ e SOARES, 2000).

Segundo Monteiro (2000), o objetivo de construir um modelo consiste na representação de um fenômeno físico através de equações fundamentais que descrevam o sistema real utilizando métodos analíticos, ou numéricos ou numérico-analíticos (COSTA, 2005), visando simular a dinâmica de níveis freáticos, de modo que o modelo transforme dados de observações em dados de saída (VON ASMUTH e KNOTTERS, 2004).

A Lei de Darcy (1856) possibilitou a expressão da densidade de fluxo de água através de um meio poroso, por unidade de superfície, em função da condutividade hidráulica do material e do gradiente hidráulico, e compõe a base do equacionamento que rege o fluxo de água subterrânea, em um meio heterogêneo, anisotrópico e em estado transiente, conforme abordado e implementado nas

pesquisas de Whitaker (1986), Reed e Brown (1995), Souza (2007), Wendland e Pizarro (2010), dado pela equação diferencial.

A equação fundamental de fluxo de água subterrânea foi derivada a partir da combinação do balanço de água e da Lei de Darcy, partindo do pressuposto do princípio da conservação de massa em um volume elementar representativo. No regime permanente o balanço de massa mostra que nenhuma massa armazenada é perdida, pois a quantidade de água que entra no sistema é igual à quantidade de água que sai:

Portanto, na descrição matemática para regime permanente de escoamento [onde não há variação de carga hidráulica ao longo do tempo ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$)], o princípio da continuidade ou balanço de massa do fluido resulta na equação (1):

$$\frac{\partial}{\partial x}(-K \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(-K \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(-K \frac{\partial h}{\partial z}) = 0 \quad (1)$$

Em que: h é a carga hidráulica e K é a condutividade hidráulica ao longo dos eixos x , y e z .

Se K for assumido como independente de x , y , e z , ou seja, a região assumida como homogênea e isotrópica, então a equação fica (2):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

Este equacionamento é a base do *MODFLOW*, modelo criado para fornecer informações sobre o estado e evolução das reservas de águas subterrâneas, bem como do potencial de recarga dos aquíferos (EL IDRYSY; DE SMEDT, 2006), que executa, através de um código de diferença finita, centrado no bloco, a modelagem tridimensional das águas subterrâneas de acordo com as variáveis relacionadas ao processo de infiltração (CECÍLIO *et al.*, 2013), quantificando, após simulação, as características do sistema hidrogeológico estudado (KIM *et al.*, 2013).

Para que o sistema do aquífero seja avaliado, a condição existente no começo de sua operação, com relação a uma determinada característica dinâmica, precisa ser definida. Geralmente, à distribuição de cargas piezométricas ou lençol d'água são dadas no tempo inicial ($t=0$).

A calibração dos parâmetros hidrodinâmicos da bacia do córrego Botafogo aconteceu em duas etapas:

em estado permanente para calibração da recarga e da condutividade hidráulica (K), e, no estado transiente

para obtenção do armazenamento específico (S_s), vazão específica (S_y) e determinação da vazão de saída (Q). Para este procedimento de ajuste, o modelo matemático *MODFLOW* foi executado no modelo *GMS*, com calibração manual dos parâmetros.

A medição de descarga líquida na bacia de estudo foi realizada na foz do córrego Botafogo com o medidor de vazão *ADV-Flow tracker* na data de 14/07/2017, conforme Figura 11, correspondendo ao valor de 17.300 m³/dia.



Figura 11– Medição de vazão.
Fonte: A própria autora.

2.4.1. Calibração dos Parâmetros do Modelo da Bacia do Córrego Botafogo

Para avaliação da superfície piezométrica na bacia, a condição de contorno de carga hidráulica definida foi de fluxo 0, de modo que a carga inicial foi ajustada para o primeiro mês, e depois mês a mês, considerando-se três zonas (Figura 12).

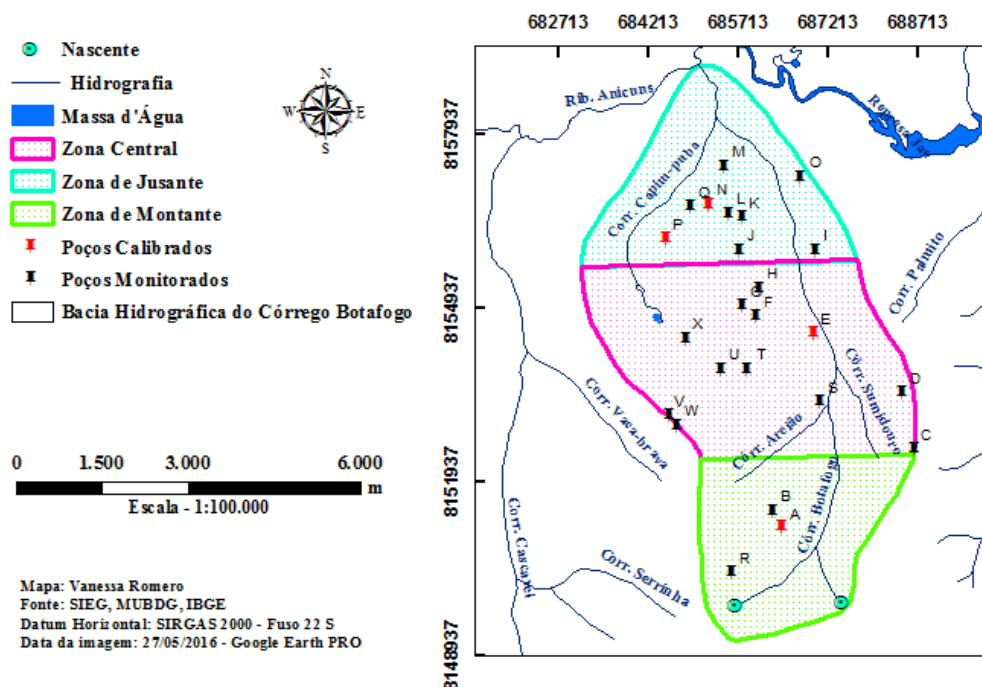


Figura 12 – Zonas, da bacia do córrego Botafogo, consideradas para modelagem dos parâmetros condutividade hidráulica (K) e armazenamento específico (S_s).

Fonte: Elaborado pela autora com dados do SIEG (2014) e dados próprios (2017).

Na calibração da condutividade hidráulica da bacia do Botafogo utilizou-se o modelo permanente, onde a carga hidráulica não varia com o tempo. Para cada poço monitorado foi inserido 01 valor médio de carga hidráulica, conforme cargas mensais apresentadas na Tabela 02.

Tabela 02 – Carga hidráulica observada nos poços monitorados.

PM	Coordenadas UTM (m)			Carga Hidráulica (m)													
				2016							2017						
	X	Y	Z	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun
A	686388	8151105	826	817	817	817	816	816	816	816	816	816	824	817	817	817	817
E	686922	8154457	763	756	756	755	755	755	755	755	755	755	761	756	756	756	755
N	685174	8156696	724	717	716	716	716	716	716	716	717	716	722	717	717	717	717
P	684460	8156102	724	715	715	715	714	714	714	714	714	714	722	715	715	715	714

Em virtude da intensa atividade antrópica na área deste estudo, especialmente na zona de amortecimento da bacia que se encontra urbanizada com pequenas porções de vegetação remanescente dispersa (ROMERO *et al.*, 2017), a taxa de evapotranspiração na área da bacia do Botafogo não representa parâmetro determinante no regime hídrico local, não constituindo, portanto, variável de entrada na modelagem.

O rebaixamento do nível do lençol freático é intrínseco ao rendimento específico (S_y) que considera a redução no volume de água armazenada devido a saídas para um rio, retirada para abastecimento de água ou evapotranspiração, ao passo que o armazenamento específico (S_s) está intimamente relacionado à diminuição da carga hidráulica do aquífero saturado e à respectiva redução na pressão dentro do sistema aquífero. Esta queda de pressão significa que menos água pode ser contida dentro do domínio modelado (RUSHTON, 2003).

Para calibração do Armazenamento Específico (S_s) e da Vazão Específica (ou rendimento específico) (S_y), o escoamento foi simulado em regime transiente, compreendendo o intervalo de tempo de dois em dois meses dentre maio/2016 e junho/2017.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em nível freático, a recarga na bacia foi estimada pela modelagem da precipitação, visando fornecer uma estimativa direta na área considerada. Em regime de fluxo permanente, a carga inicial foi ajustada, simultaneamente à recarga,

segundo a condição do primeiro mês (Quadro 01, Tabela 02) e a vazão de saída calculada no *MODFLOW* foi de 18.646 m³/dia.

Os poços A, E, N e P foram selecionados para modelagem dos parâmetros hidrodinâmicos (Tabela 03) calibrados na bacia do córrego Botafogo para a condição de contorno definida de fluxo 0, pois representa uma zona de fluxo local. Na zona de montante da bacia, a condutividade hidráulica calibrada foi 0,01 m/dia. Na zona central, 0,9 m/dia e na zona de jusante, 50 m/dia, indicando que, nos poços da zona de jusante da bacia (Poços N e P, Tabela 02), o aumento da condutividade hidráulica nos modelos gerados para os poços selecionados (Figuras 03 a 10) acarretou diminuição do nível do lençol freático (Figuras 13, 14, 15 e 16).

Tabela 03 – Sumário dos Parâmetros Hidráulicos da Bacia do Córrego Botafogo calculados pela modelagem dos dados observados.

Dados calibrados					
Condutividade Hidráulica (m/dia)			Ss (m³/dia)		Sy (m³/dia)
Montante	Central	Jusante	Máximo	Mínimo	
0,01	0,9	50	0,48	0,048	18.646

Na modelagem do armazenamento específico, o valor máximo ajustado para o parâmetro foi da ordem de 0,48 m³/dia e o mínimo, equivalente a 0,048 m³/dia. Verificou-se que o modelo transiente da bacia do Botafogo calibrado com o valor máximo para este parâmetro permaneceu contínuo ao longo do tempo, enquanto que, para o valor mínimo calibrado, houve oscilação.

Segundo Rushton (2003) a oscilação do nível do lençol freático de uma bacia se justifica em razão das condições de movimento da água que infiltra no solo, atinge o lençol e flui para o aquífero. Na bacia objeto desta pesquisa, o comportamento oscilante do lençol freático pôde ser verificado pela calibração do armazenamento específico e refletiu-se na variação da carga hidráulica, que possivelmente é causada, por bombeamentos (acarretando maior retirada efetiva de água na região podendo estar intrinsecamente relacionada ao rebaixamento do lençol na área da bacia do córrego Botafogo, em determinadas épocas, em até 1,5 m, conforme Quadro 02) ou pela recarga provocada pela precipitação na bacia de estudo.

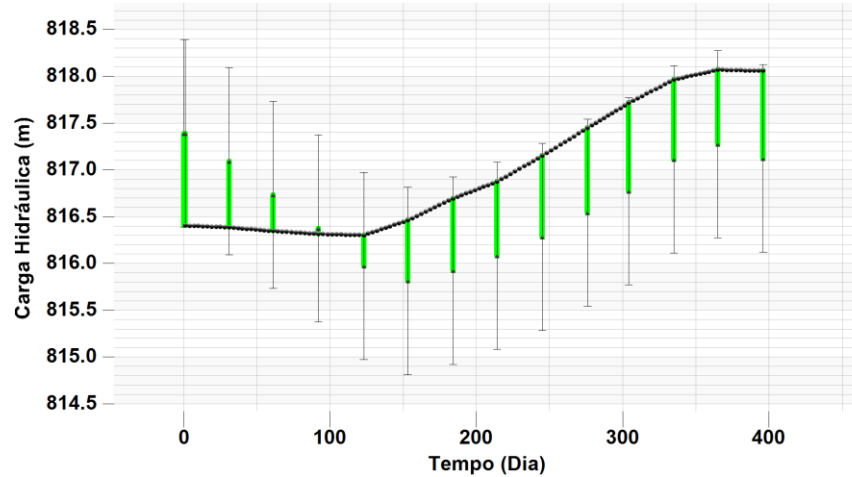


Figura 13 - Condutividade Hidráulica calibrada no Poço A.

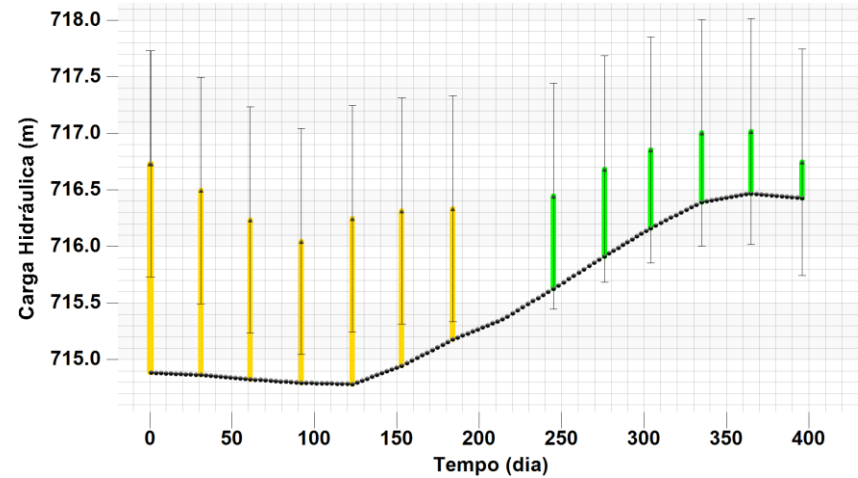


Figura 15 - Condutividade Hidráulica calibrada no Poço N.

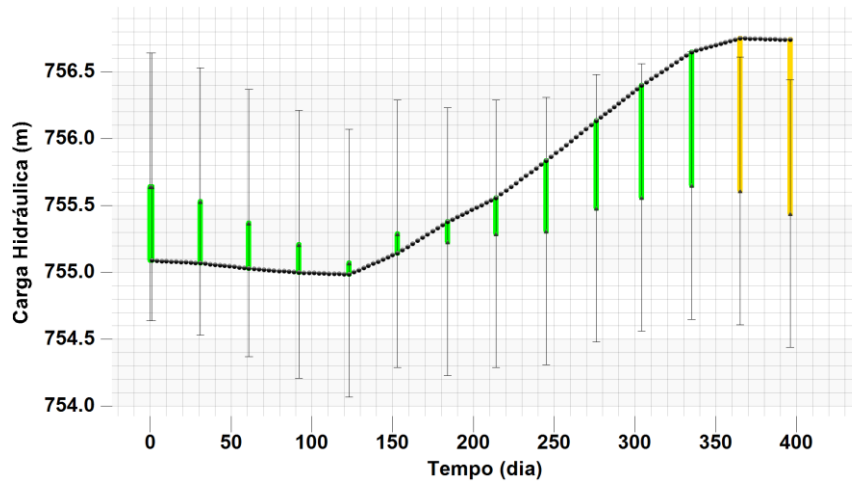


Figura 14 - Condutividade Hidráulica calibrada no Poço E.

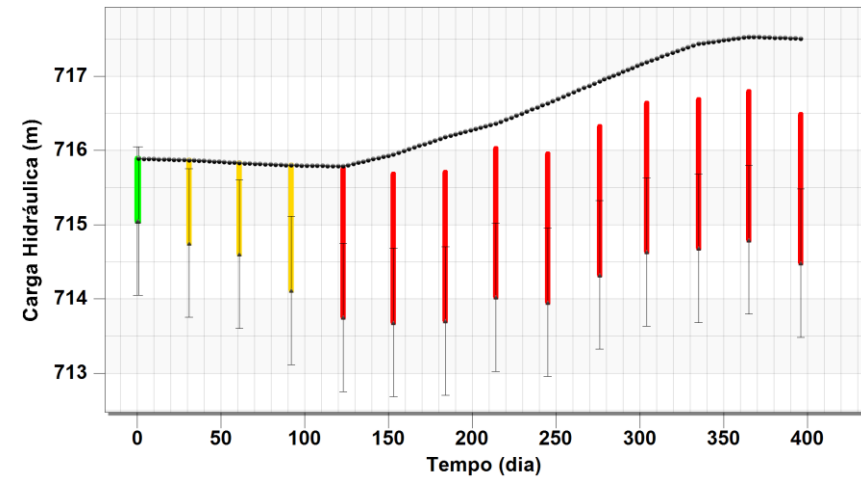


Figura 16 - Condutividade Hidráulica calibrada no Poço P.

Nota técnica: As cores indicam intervalos de confiança – o verde, índice menor que 1,0 m do observado; o amarelo, 1,0 – 2,0 m; o vermelho, mais de 2,0 m de diferença.

4. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Na modelagem do lençol freático na bacia do córrego Botafogo, a condição de contorno de carga foi modelada no regime permanente, admitindo que a água fica contida na bacia, em nível de fluxo raso. A recarga na bacia foi calculada pela modelagem da precipitação em 18.646 m³/dia, visando fornecer uma estimativa de recarga direta na área considerada.

Em regime de fluxo transiente, observou-se que, com o aumento da condutividade hidráulica, o nível do lençol freático subiu, na zona de jusante (Poços N e P – Tabla 02) da bacia do Botafogo (Figuras 04, 05, 06 e 07). Em contrapartida, verificou-se que o nível do lençol permaneceu contínuo ao longo do tempo, em termos do maior valor calibrado para o parâmetro armazenamento específico (0,48 m³/dia). Portanto a oscilação do nível do lençol freático na área de abrangência da bacia do Botafogo pode ser refletida, tanto na recarga ocasionada pela precipitação, quanto na variação da carga hidráulica (cujo aumento tende a rebaixar o lençol).

Nesse sentido, conclui-se que a modelagem matemática com o *MODFLOW* para determinação das propriedades hidráulicas condutividade hidráulica, recarga, armazenamento específico e vazão específica em nível freático para a bacia do córrego Botafogo, foi eficiente uma vez que permitiu avaliar o comportamento do lençol freático no período contemplado pela pesquisa.

Recomenda-se ampliar este estudo incorporando os poços tubulares na modelagem verificando o grau de influência dos mesmos na diminuição da vazão da bacia em determinadas épocas e, concomitantemente, recomenda-se a medição de vazão mensal na área de estudo.

5. REFERÊNCIAS

AHMADI, S. H.; SEDGHAMIZ, A. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 129, n. 1-3, p. 277, 2007.

AQUAVEO™. Escritório de engenharia de *software* e serviços de consultoria em modelagem de águas subterrâneas e superficiais (Provo, Utah). **GMS - Groundwater Modeling System**, versão 10.3. EUA, Copyright © 2007 Aquaveo, LLC. Disponível em: <<https://www.aquaveo.com/>>.

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport**. Academic Press. San Diego. 1992. 381p.

_____; _____. HUNT, R. J. **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport**. Academic press. 2015.

BEDIENT, P. B.; RIFAI, H. S.; NEWELL, C. J. **Ground Water Contamination: Transport and Remediation**. Prentice-Hall, PTR, New Jersey, 1994.

CECÍLIO, R. A.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F.F; SILVA, D. D. Modelo para estimativa da infiltração de água e perfil de umidade do solo **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, n. 2, p. 411-421, fev. 2013.

COSTA, C. T. F. **Modelagem Numérico-Analítica do Fluxo Hídrico e da Contaminação de Água Subterrânea por Derivados de Petróleo**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, UFC. 2005.

EL IDRYSY, Houcyne; DE SMEDT, Florimond. Modelling groundwater flow of the Trifa aquifer, Morocco. **Hydrogeology Journal**, v. 14, n. 7, p. 1265-1276, 2006.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; REGINATO, P. A. R. Simulação da superfície de equilíbrio de água subterrânea aproximada em escala regional. **RBRH–Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 3, 2014.

GETIRANA, Augusto. Extreme water deficit in Brazil detected from space. **Journal of Hydrometeorology**, n. 2015, 2015.

GOIÂNIA. Prefeitura Municipal de Goiânia. **Diagnóstico ambiental da sub-bacia do córrego Botafogo**. Agência Municipal de Meio Ambiente – AMMA – GO. 2008.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, n. 1, p. 91-109, 2002.

KRESIC, N. 1997. **Quantitative Solution in Hydrogeology and Groundwater Modeling**. Lewis Publishers, Florida.

KIM, J.; CHOI, J.; CHOI, C.; PARK, S. Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea. **Science of the Total Environment**, v. 452, p. 181-195, 2013.

LACERDA FILHO, J. V. *et al.* **Geologia e Recursos Minerais do Estado de Goiás e do Distrito Federal – Relatório do Mapa Geológico do Estado de Goiás - Escala 1:500.000**. Goiânia: CPRM/METAGO/UnB, 1999. 200p.

MAMEDE, L.; ROSS, J. L. S.; SANTOS, L. M.; NASCIMENTO, M. A. L. S. Geomorfologia. Folha SE-22, Goiânia. Projeto Radambrasil. **Levantamento dos Recursos Naturais**, v. 31, p. 349-412, Rio de Janeiro, 1983.

MATTIUZI, C. D. P.; SIMON, F. W.; KIRCHHEIM, R. E.; COLLISCHONN, W.; REGINATO, P. A. R.; FAN, F. M. Comparação de métodos de estimativa de recarga aquífera aplicados à Bacia do rio Ibicuí/RS. In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2015, Brasília. **Anais eletrônicos...** Brasília, SBRH, 2015. Disponível em: <http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-1076_comparacao-de-metodos-de-estimativa-de-recarga-aquifera-aplicados-a-bacia-do-rio-ibicuis>. Acesso em: 09 set 2017.

MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. 1988. **A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model**. U.S. Geological Survey, Book 6, chapter A1.

MONTEIRO, A. B. Modelagem de Fluxo subterrâneo nos aquíferos da planície do Recife seus encaixes. **Centro de tecnologia e Geociências**, 2000.

PINTO, L. V. A.; BOTELHO, S. A.; DAVIDE, A. C.; FERREIRA, E. Estudo das nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. **Scientia Florestalis**, n. 65, p. 197 – 206, 2004.

REED, S. C.; BROWN, D. Subsurface flow wetlands - a performance evaluation. **Water environment research**, v. 67, n. 2, p. 244-248, 1995.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Modelos hidrológicos para gestão ambiental. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Programa de Ciência e Tecnologia para a Gestão de Ecossistemas. Ação, "Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental". **Relatório Técnico Parcial**. São Paulo, 2000, 60 p.

ROMERO, V.; FORMIGA, K. T. M.; MARCUZZO, F. F. N. Estudo hidromorfológico de bacia hidrográfica urbana em Goiânia/GO. **Ciência e Natura**, v. 39, n. 2, 2017.

RUSHTON, K. R. In: **Groundwater Hydrology: Conceptual and Computational Models**. UK: Wiley, 2003. p. 1 – 142.

SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO (Goiás). Superintendência de Geologia e Mineração. **Hidrogeologia do estado de Goiás e Distrito Federal**. Goiânia, 2006. 236 p. (Série Manuais).

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM (Brasil). Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Unidades Aquíferas no Município De Goiânia/GO e Entorno**. Goiânia, 2016. 58 p. (Série Manuais).

SOUZA, C. D. Simulação computacional do fluxo hídrico subterrâneo na região do Cariri e calibração utilizando gradiente das cargas hidráulicas. 2007.

VON ASMUTH, J. R.; KNOTTERS, M. Characterising groundwater dynamics based on a system identification approach. **Journal of Hydrology**, v. 296, 2004. p. 118-34.

WHITAKER, S. Flow in porous media I: A theoretical derivation of Darcy's law. **Transport in porous media**, v. 1, n. 1, p. 3-25, 1986.

WENDLAND, E.; PIZARRO, M. L. P. **Modelagem computacional do fluxo unidimensional de água em meio não saturado do solo**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 424-434, Junho, 2010.

WOTTRICH, I. (2012). **Uso de ferramentas computacionais na construção de modelos estocásticos de fluxo e delimitação de perímetro de proteção de poços**. Porto Alegre: Dissertação (Mestrado) Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em razão do uso e ocupação inadequados da zona de amortecimento da bacia do córrego Botafogo, quantificar as consequências do escoamento superficial e do grau de infiltração na área, decorrente da precipitação e, respectivamente, do grau de impermeabilização, foi possível em razão do monitoramento do nível do lençol freático e da modelagem dos parâmetros hidráulicos úteis na compreensão da dinâmica da bacia hidrográfica objeto do estudo, em termos do aquífero livre. Em razão da carência de dados hidrogeológicos locais, a inferência de dados de carga hidráulica na bacia do Botafogo através de técnicas geoestatísticas, auxiliou na modelagem tridimensional do fluxo, constituindo, variável de entrada no modelo de águas subterrâneas *MODFLOW*, executado no *GMS*, e possibilitou, quantificar, após calibração, as características do sistema hidrogeológico da área da bacia. Em nível freático, a recarga na bacia foi estimada pela modelagem da precipitação, mediante ajuste da carga inicial segundo a condição do primeiro mês (maio/2016), e a vazão de saída na área modelada foi calculada em 18.646 m³/dia. Os valores simulados em regime transiente para o parâmetro condutividade hidráulica indicaram que, o maior aumento (50 m/dia) da condutividade hidráulica, foi calibrado para a zona de jusante da bacia (Poços N e P) acarretando diminuição do nível do lençol freático. Além disso, verificou-se que o nível do lençol freático permaneceu contínuo ao longo do tempo, quando simulado para o valor máximo calibrado de 0,48 m³/dia para o parâmetro armazenamento específico, em contrapartida, oscilou enquanto calibrado no valor mínimo de 0,048 m³/dia. Considerando-se que a quantidade de água subterrânea pode variar conforme as características de eventos de chuva, bem como em virtude das características hidrogeológicas da bacia, concluiu-se com esta pesquisa que as variações do nível d'água observadas nos poços 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 de gestão da unidade que mitiguem os efeitos da degradação na bacia, de modo que a modelagem matemática constituiu ferramenta útil na determinação das propriedades hidráulicas em nível freático para a bacia do córrego Botafogo, uma vez que permitiu avaliar o comportamento do lençol freático no período contemplado pela pesquisa.