

ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM AQUÍFERO ALUVIAL NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Bárbara Barbosa Tsuyuguchi^{1}; Armando César Rodrigues Braga²; João Dehon de Araújo Pontes Filho³; Mateus Rodrigues da Costa⁴; Janiro Costa Rêgo⁵; Carlos de Oliveira Galvão⁶*

Resumo – Este artigo apresenta uma abordagem de avaliação da não homogeneidade de aluviões característicos da região semiárida brasileira, ao determinar a condutividade hidráulica por meio de metodologia que leva em consideração a variabilidade litológica-estratigráfica e sua influência no fluxo em situações de diferentes níveis do lençol. A variação deste parâmetro ao longo do aquífero é também investigada através do seu zoneamento, estabelecido a partir da análise da topografia, geologia e distribuição dos poços de monitoramento. A estimativa, realizada através da modelagem numérica, faz uso de uma ferramenta de calibração automática. Os resultados obtidos para a condutividade hidráulica em um aquífero em Sumé, PB, variaram de 20,0 m/dia até 174,8 m/dia em todo o aquífero. Dentro de uma mesma zona, o maior intervalo de variação entre diferentes níveis do lençol foi de 45,2 a 155,70 m/dia. Esta dinâmica pode ser explicada pelas seguintes características do aquífero aluvial: a) pequenas dimensões, notadamente da espessura; b) alta variabilidade litológica; c) alta variação das diferenças de altura de nível do lençol em relação à espessura do aquífero.

Palavras-Chave – Aquíferos aluviais, Condutividade Hidráulica, Modelagem

VARIABILITY ANALYSIS OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN ALLUVIAL AQUIFER IN THE BRAZILIAN SEMIARID REGION

Abstract – This study presents an approach for the evaluation of non-homogeneity of alluvial aquifers in the Brazilian semiarid region, determining the hydraulic conductivity using a methodology which considers the lithologic-stratigraphy variability and its influence in the flow under different conditions of the phreatic surface. The parameter variation along the aquifer is also investigated through its zoning, established from the analyses of the topography, geology and monitored wells. The estimative, performed through numerical modelling, uses an automatic calibration tool. The results show that the hydraulic conductivity in an aquifer in Sumé, PB, varies between 20,0 m/day and 174,8 m/day throughout the aquifer. In a same zone, the highest variation interval between different phreatic levels was from 45,2 m/day to 155,7 m/day. This can be explained by the following characteristics of the alluvial aquifer: a) small dimensions, thickness specially; b) high lithological variability; c) high variation of the level height differences in relation to the aquifer thickness.

Keywords – Alluvial Aquifers, Hydraulic Conductivity, Modelling.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECA, UFCG. E-mail: barbara.tsuyu@gmail.com.

² Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais – PPGECA, UFCG. E-mail: armandocesar.r@gmail.com.

³ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECA, UFCG. E-mail: dehonambiental@gmail.com.

⁴ Graduação em Engenharia Civil. UFCG. E-mail: mateusrodrigues.civil@gmail.com.

⁵ Professor do Departamento de Engenharia Civil – UFCG. E-mail: janiro@dec.ufcg.edu.br.

⁶ Professor do Departamento de Engenharia Civil – UFCG. E-mail: carlos.galvao@ufcg.edu.br.

1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos subterrâneos são considerados estratégicos, principalmente para regiões de reconhecida escassez hídrica. O semiárido brasileiro é uma das regiões do país que necessita especial atenção a esse recurso por possuir um regime hidrológico irregular, com baixos índices pluviométricos, estação chuvosa curta e elevadas taxas de evaporação, além de ter formação rochosa predominantemente cristalina, com pequeno potencial de armazenamento. Nesse sentido, o aproveitamento de pequenos aquíferos aluviais é prática comum e importante fonte de recursos hídricos para esta região. (Rêgo et al., 1999; Montenegro et al., 2003; Monteiro et al., 2014 ANDRADE, 2014). Os aquíferos aluviais, formados às margens dos rios, resultam da erosão, do transporte e deposição de sedimentos, de origem recente. Geralmente apresentam alta variabilidade litológica tanto em profundidade, como também ao longo do aquífero, interferindo fortemente nos seus parâmetros hidrodinâmicos, e consequentemente no fluxo subterrâneo (Burte, 2008; Vieira, 2002).

O aluvião no Nordeste tem substrato cristalino e dimensões relativamente pequenas, que limitam sua potencialidade. O nível do lençol freático, em período chuvoso, pode chegar a atingir a superfície, mas já na época de estiagem, que predomina ao longo do ano, a lâmina d'água armazenada no aquífero sofre redução significativa, podendo ocorrer inclusive um esvaziamento parcial do aquífero. Deste modo, a depender do nível freático e da geologia, a água circula por camadas com diferentes condutividades hidráulicas.

A condutividade hidráulica, ou coeficiente de permeabilidade (K), está intrinsicamente relacionada à litologia e, por se tratar de um dado de entrada fundamental na simulação do fluxo subterrâneo, diferentes metodologias vêm sendo utilizadas para sua estimativa, sejam elas realizadas através ensaios em laboratório, ensaios in-situ, ou empregando-se modelagem (Demétrio, 2013; Silva, 2012; Batista et al., 2012). A simulação matemática do fluxo em aquíferos aluviais requer informações mais detalhadas, uma vez que pequenas diferenças causam elevado impacto nos resultados obtidos.

Este artigo apresenta uma abordagem de avaliação da não homogeneidade dos aluviões característicos da região semiárida brasileira, ao determinar a condutividade hidráulica por meio de metodologia que leva em consideração a variabilidade litológica-estratigráfica e sua influência no fluxo em situações de diferentes níveis do lençol. A variação deste parâmetro ao longo do aquífero é também investigada através do seu zoneamento, estabelecido a partir da análise da topografia, geologia e distribuição dos poços de monitoramento. A estimativa, realizada através da modelagem numérica, faz uso da ferramenta de calibração automática.

2. A SIMULAÇÃO DO FLUXO SUBTERRÂNEO E A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A equação geral do fluxo subterrâneo bidimensional permanente está apresentada abaixo (Equação 2).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

Onde K é a condutividade hidráulica, parâmetro que depende do tamanho e arranjo dos poros e das características dinâmicas do fluido (Heath, 1982), e expressa quantitativamente a habilidade do solo de transmitir água dado um gradiente hidráulico (variação da carga hidráulica ao longo das direções x e y).

Diante da complexidade da resolução das equações que representam o fluxo das águas subterrâneas, modelos numéricos vêm sendo amplamente utilizados para simulá-lo. Os modelos têm o objetivo de reproduzir as condições de campo, e quando bem construídos podem servir como importante ferramenta na gestão integrada dos recursos hídricos (Wang & Anderson, 1986), principalmente devido à capacidade de simular diferentes situações em que não seria possível se verificar experimentalmente (Singh, 2014). Por outro lado, a resolução dos modelos requer parâmetros de entrada, que variam no tempo e no espaço, e demandam, para sua aquisição, atividades de levantamento e monitoramento. Estes parâmetros podem ser melhor ajustados à realidade através de um processo conhecido como calibração. Este ajuste é realizado modificando-se o seu valor até que o modelo simule cargas hidráulicas e fluxo semelhantes aos observados, e pode ser feito de forma manual, através de tentativa e erro, ou de forma automática (Anderson e Woessner, 2002).

A calibração pode ser obtida mais rapidamente através do uso de um modelo inverso. Esse tipo de modelo ajusta sistematicamente um parâmetro dentro de uma faixa de distribuição atribuída pelo usuário até que a diferença entre os valores observados e calculados seja minimizada. Para isso são utilizadas duas abordagens, por pontos e por zonas. A abordagem por zonas consiste em identificar polígonos de condutividade hidráulica semelhantes, assumindo um valor inicial de K para cada zona. O modelo inverso, então, irá ajustar valores para K para cada zona na tentativa de minimizar o erro residual entre os valores de carga hidráulica calculados e observados.

3. ÁREA DE ESTUDO

O aquífero aluvial estudado situa-se às margens do Rio Sucuru, de regime intermitente, a jusante do açude de porte médio de Sumé, faz parte da região semiárida do Alto Curso do Rio Paraíba e está localizado entre as coordenadas geográficas $36^{\circ}54'0''\text{W}$ $7^{\circ}41'50''\text{S}$ e $36^{\circ}49'50''\text{W}$ $7^{\circ}40'0''\text{S}$. Na área de estudo, encontra-se o perímetro irrigado de Sumé, criado em 1973 pelo DNOCS (Departamento Nacional de Obras contra as Secas), que era suprido pelas águas do reservatório superficial mencionado (MIN, 2007). Contudo, na década de 1980, frente ao período de seca instalado na região e à construção de barramentos a montante, seu volume tornou-se insuficiente para atendimento de todas as demandas, levando à interrupção do fornecimento de água para o Perímetro. Então, o Perímetro passou a ser abastecido pela exploração do aquífero aluvial. Além da recarga natural, este aquífero recebe contribuições de esgotos brutos e tratados.

O aluvião do Rio Sucuru, de substrato cristalino, tem pequenas dimensões, de 2 a 15 metros de profundidade e de 50 a 500 metros de largura. A extensão do aquífero é de cerca de 40 km, porém foram estudados os primeiros 12 km deste trecho, limitando-se à região do Perímetro Irrigado. A elevada variabilidade litológica no aquífero aluvial já foi detectada no levantamento geológico realizado pela ATECEL, com 173 furos de sondagens (ATECEL, 1999).

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas empregando-se simulações do fluxo subterrâneo, com o intuito de propor estratégias de manejo e tecnologias para melhor aproveitamento das águas dos aluviões pelos irrigantes (Vieira, 2002; Rêgo et al., 2014; Alves, 2016). O refinamento dos parâmetros de entrada do modelo, resumidamente descritos abaixo, levará a simulações que melhor reproduzem as condições existentes na área.

O monitoramento piezométrico é uma importante ferramenta para caracterizar as variações de gradiente hidráulico no aquífero. A aquisição desses dados foi realizada a partir da leitura manual de do nível estático de cerca de 40 poços, realizada quinzenalmente, e de três piezômetros com leitura automática em intervalos de 30 minutos. O monitoramento foi iniciado em 2015 e continua sendo realizado até a presente data.

Os dados topográficos foram extraídos de um Modelo Digital de Terreno (MDT), gerado interpolando as curvas de nível do perímetro irrigado, produzidas pelo DNOCS, com espaçamento vertical de 1 metro. Já o modelo geológico foi criado a partir de perfis litológicos obtidos por meio de sondagens (ATECEL, 1999).

Foi realizado um teste de bombeamento de 24h por Vieira (2002) que permitiu estimar localmente a condutividade hidráulica K , de 68 m/dia, e a porosidade eficaz de 10%. Nas pesquisas realizadas até o momento, estes valores são utilizados para todo o aquífero.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar o objetivo proposto de melhor representar a heterogeneidade do aquífero, foram estimados coeficientes de permeabilidade (K) em 7 zonas do aquífero, através da simulação do fluxo em regime permanente, em três diferentes datas de modo a caracterizar a ocorrência de diferentes níveis freáticos, ordenados do maior para o menor nível: 21 de março, 30 de maio e 21 de novembro. O ano de 2016 foi escolhido por apresentar variações de nível consideráveis, com poços alagados após uma alta recarga no início do ano, e próximo ao esvaziamento, em dezembro, a exemplo do poço 21 (Figura 1a). No esquema ilustrativo da Figura 1b pode-se observar a circulação das águas em camadas com litologias diferentes, de acordo com o nível freático alcançado.

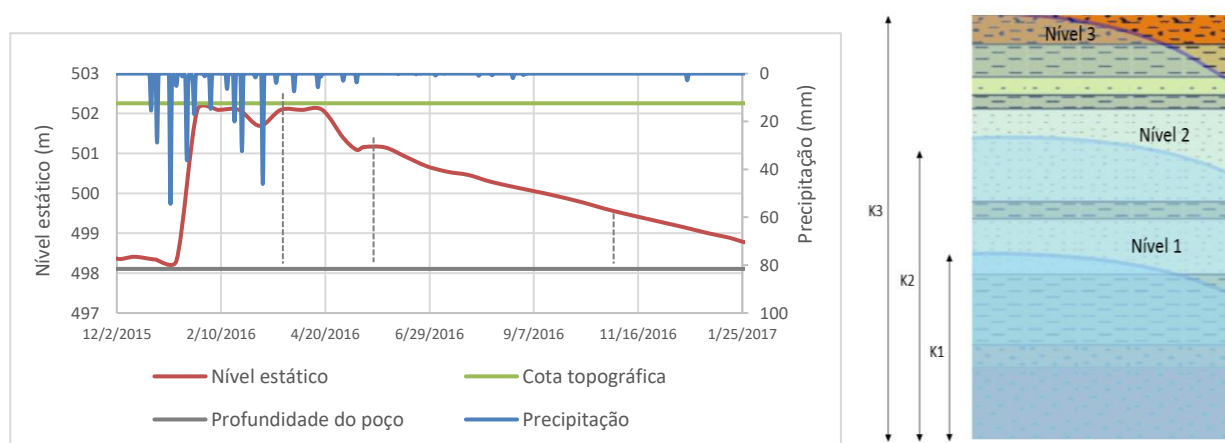


Figura 1: a) Gráfico de variação do nível estático do poço 21; b) Esquema ilustrativo

As simulações foram realizadas utilizando o software FEFLOW - *Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat*, que faz uso do método de elementos finitos na resolução das equações diferenciais do fluxo subterrâneo. Na calibração automática, o software *PEST – Parameter Estimation Software Tool* foi utilizado, integrado ao modelo de fluxo subterrâneo, através da interface gráfica de usuário do FEFLOW, o FePEST.

A malha do modelo, contendo o contorno do aluvião, foi gerada no FEFLOW, a partir dos dados topográficos e das profundidades do cristalino observadas nos perfis geológicos, e foi parcelada nas 7 zonas, conforme Figura 2. O zoneamento foi definido a partir dos dados topográficos, dos perfis geológicos e da distribuição espacial dos poços de monitoramento, e permite representar a variabilidade existente ao longo do aquífero aluvial.

A partir da rede de monitoramento de nível subterrâneo, foram selecionados 14 poços monitorados para definir as condições de contorno do modelo, através de cargas hidráulicas especificadas, e 11 poços foram inseridos como cargas observadas. Para cada zona, são especificados

o valor inicial e um intervalo dentro do qual o K pode variar. O modelo então, através de sucessivas iterações, ajusta os valores de K, na tentativa de aproximar as cargas simuladas das observadas. o valor inicial estipulado foi aquele obtido por Vieira (2002), através de teste de bombeamento, e as faixas de variação foram obtidas considerando as variações litológicas do aluvião, que em geral é predominantemente arenoso, com presença de cascalhos e argila, e tem grandes discontinuidades.

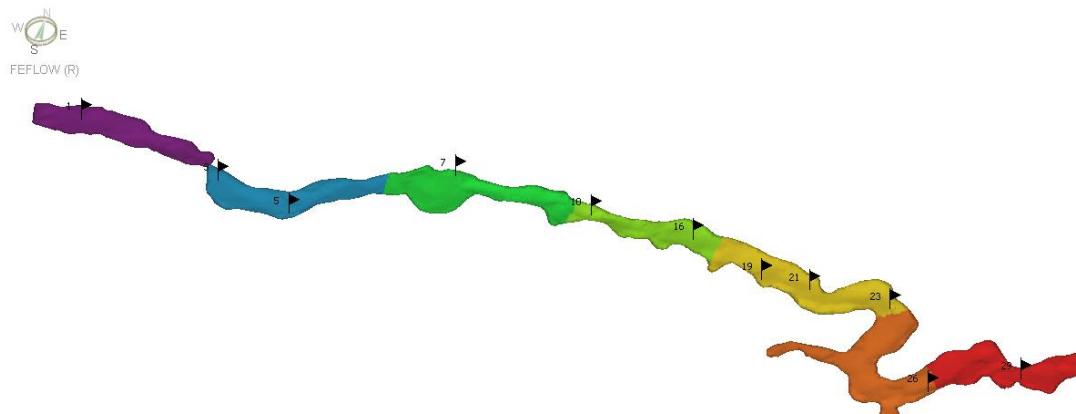


Figura 2: Localização das zonas homogêneas e dos poços com as cargas observadas, utilizados no modelo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme descrito, foram realizadas calibrações para o regime permanente em três datas com diferentes níveis estáticos de forma a representar três profundidades diferentes. Os resultados das condutividades hidráulicas obtidas (Tabela 1) mostram a variabilidade espacial do K em todo o aquífero, horizontal e verticalmente. Os valores variaram de 20,0 m/dia até 174,8 m/dia.

Os coeficientes de determinação (R^2) calculados mostram que o modelo calibrado conseguiu representar de forma satisfatória os níveis simulados (Figura 3). Os dados simulados para a primeira data apresentaram menor RMSE (raiz do erro quadrático médio) com um bom ajuste entre os pares de valores. Este comportamento se repetiu para o dia 30/05/2016. Para a última simulação, que representa o período em que as cargas tiveram menor valor, houve o maior RMSE, e percebe-se que o modelo subestimou os dados de cargas potenciométricas maiores, enquanto as demais ficaram um pouco acima dos valores observados. Tal comportamento pode ser explicado como uma tentativa da solução numérica, através da iteração no valor K, de reduzir o gradiente hidráulico, mantendo-se as condições de contorno ao longo do fluxo, para evitar a ocorrência do esvaziamento do aquífero.

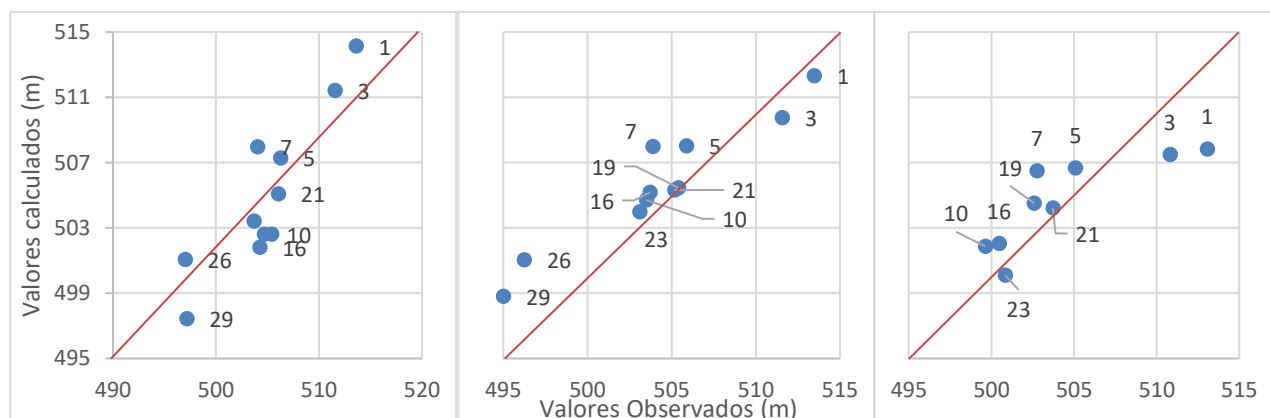


Figura 3 - Diagrama de dispersão das cargas hidráulicas após a calibragem

Tabela 1 - Condutividades hidráulicas estimadas através de calibração automática

Condutividade hidráulica (m/dia)					
	21-Mar	30-May	21-Nov	Média	Desvio padrão
Zona 1	35.00	24.70	90.80	50.17	35.56
Zona 2	70.00	174.80	93.70	112.83	54.96
Zona 3	65.00	40.00	66.30	57.10	14.82
Zona 4	87.20	70.10	44.80	67.37	21.33
Zona 5	155.70	154.70	45.20	118.53	63.51
Zona 6	52.40	63.20	26.50	47.37	18.86
Zona 7	23.70	20.00	64.00	35.90	24.41
Coeficiente de determinação	0.7960	0.9101	0.8222		

As condutividades hidráulicas apresentam altos desvios padrão e mudanças consideráveis para os instantes estudados. No citado trabalho de Vieira (2002), apresentam-se perfis litológicos do solo nas zonas estudadas, nos quais verifica-se variabilidades na sua composição para diferenças de profundidade em torno de 1,50 m. Os perfis, em cada zona, foram analisados em conjunto com os resultados apresentados na Tabela 1.

Para a Zona 2, com uma profundidade de 3 a 4 m, existe, até o cristalino, a ocorrência de argilas, areias finas, médias e grossas e cascalho, com a predominância de argila próximo a superfície. Esta litologia pode explicar a redução ocorrida na condutividade com níveis estáticos mais altos.

A região com mais perfis litológicos disponíveis é a Zona 4. Nesta área, com o aumento da profundidade é possível perceber um aumento na ocorrência de argila, para perfis com profundidade de até 4 ou 5 metros. Isto foi retratado na redução da condutividade hidráulica que ocorre à medida que o nível estático também é reduzido.

Na Zona 03 e na Zona 06 os perfis mostram uma predominância de solos arenosos de granulometria fina a média. A Zona 05 apresenta solo com areia média, grossa e cascalho. Nestas três zonas, entretanto, também há a ocorrência de argilas em alguns locais, com lentes de espessura de até 1 metro nas Zonas 03 e 05 e de até 2 metros na Zona 06. A ocorrência de pacotes de argilas de forma descontínua ao longo do aquífero pode explicar a redução na condutividade hidráulica ocorrida.

Finalmente, na Zona 07 ocorre, próximo à superfície, solos siltosos e arenosos de granulometria fina e, com o aumento da profundidade, solos arenosos de granulometria média e grossa. Essa característica litológica se apresenta com o aumento da condutividade hidráulica para níveis estáticos menores.

Verifica-se, então, que para aquíferos aluviais do tipo estudado, a variação dos níveis estáticos ao longo do tempo pode interferir no fluxo não somente através do gradiente hidráulico, mas também em virtude da litologia da camada saturada. A ocorrência frequente de lentes de silte ou argila, em um aquífero predominantemente arenoso, provoca a redução da condutividade hidráulica do pacote aluvial. O emprego de uma condutividade hidráulica equivalente para toda a espessura é, no entanto, impossibilitada pelo caráter descontínuo das referidas camadas.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho levanta um aspecto do fluxo em aluviões típicos da região semiárida, que representa um desafio nos estudos destes aquíferos: a variação do parâmetro de condutividade hidráulica de acordo com o nível do lençol freático. Foi possível representar este aspecto por meio da modelagem computacional, calibrando a condutividade hidráulica para diferentes níveis estáticos de forma a levar em consideração a variabilidade litológica-estratigráfica.

A partir da variação da carga hidráulica ao longo do tempo os resultados obtidos para a condutividade hidráulica variaram de 20,0 m/dia até 174,8 m/dia em todo o aquífero. Dentro de uma mesma zona, o maior intervalo de variação se deu na Zona 5, de 45,2 a 155,7 m/dia.

Esta dinâmica pode ser explicada pelas seguintes características do aquífero aluvial: a) pequenas dimensões; b) alta variabilidade litológica; c) alta variação das diferenças de altura de nível do lençol em relação à espessura do aquífero. A investigação desta questão pode conduzir a melhores simulações em regime transitório.

AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho agradecem à FINEP, à CAPES e ao CNPq pelo fomento. Este trabalho insere-se no Projeto BRAMAR - *Desenvolvimento de Estratégias e Tecnologias Inovadoras para Mitigação dos Efeitos da Escassez de Água no Nordeste Brasileiro*.

REFERÊNCIAS

- ALVES, E. C. (2016). *Potencialidade e Manejo dos Recursos Hídricos do Aquífero Aluvial em Sumé – PB*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande.
- ANDERSON, M. P. WOESSNER, W. W. (2002). *Applied Groundwater Modelling, Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press, Inc., San Diego, 381 p.
- ANDRADE, C. W. L. et al. (2014). Variabilidade espacial da textura em solo aluvial sob o cultivo de cenoura *Daucus Carota L.* *Revista Pernambucana de Tecnologia*, v. 2, p. 59-67.
- ATECEL (1999). Estudo em Aluviões em um Trecho do Rio Sucuru para Irrigação do Perímetro Sumé. Relatório Final. Campina Grande-PB. 1999.
- BATISTA, M. L. C.; RÊGO, J. C.; RIBEIRO, M. M.; ALBUQUERQUE, J. P. T. (2010). Determinação dos parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero confinado através de modelagem matemática. In *Anais XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços*.
- BURTE, J. D. P. (2008). *Os pequenos aquíferos aluviais nas áreas cristalinas semi-áridas: funcionamento e estratégias de gestão. Estudo de caso no nordeste brasileiro*. Tese (Doutorando em Engenharia Civil) Universidade Federal do Ceará, 310p, Fortaleza.
- DEMÉTRIO, J. G. A.; PAIVA, A. L. R.; FREITAS, D. A.; BATISTA, A. G. S.; CABRAL, J. J. S. P. (2013). Características Hidrogeológicas das Aluviões do Rio Beberibe na Área da Bateria de Poços no Bairro de Caixa d'Água, Olinda-PE. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 27, pp. 111-126.
- DOHERTY J. (2004). *PEST: model independent parameter estimation*. Watermark numerical computing, 5ª ed. Brisbane, Australia.

- HEATH, R.C (1982). *Hidrologia Básica de Água Subterrânea*. Geological Survey water-supply paper; 2220. North Carolina.
- MINISTÉRIO PÚBLICO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (2007). *Elaboração de Diagnóstico e Plano de Desenvolvimento do Perímetro Irrigado Sumé*, 1 v. Brasília, 206 p.
- MONTEIRO, A.L.; MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S. M.G. (2014). Modelagem de Fluxo e Análise do Potencial Hídrico de Aquífero Aluvial no Semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, p. 151-163.
- MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. DE A.; MACKAY, R.; DE OLIVEIRA, A. S. C. (2003). Dinâmica hidro-salina em aquífero aluvial utilizado para agricultura irrigada familiar em região semi-árida. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, V.8, N. 2, p. 85-92.
- RÊGO, J. C.; ALBUQUERQUE, J. P. T. ; VIEIRA, L. J. S. (1999). Reativação de perímetros de irrigação através da exploração de aquíferos aluviais - o caso de Sumé. In: *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte.
- RÊGO, J. C.; ALBUQUERQUE, J. P. T. ; PEREIRA, I. J. (2014). Poço Bico-de-Pato. In: Furtado, D. A.; Baracuh, J. G. V.; Francisco, P. R. M.; Neto, S. F.; Sousa, V. A.. (Org.). *Tecnologias Adaptadas para o Desenvolvimento Sustentável do Semiárido Brasileiro*. 1ªed.Campina Grande: Epgraf, v. 2, p. 250-255.
- SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, T. E. M. (2012). Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.16, n.1, p.27–36.
- SINGH, A (2014). *Groundwater resources management through the applications of simulation modelling: A review*, Science of the Total Environment.
- VIEIRA, L. J. S. ; RÊGO, J. C. ; SRINIVASAN, V. S. (2002) . Aplicação de um modelo matemático de simulação do fluxo subterrâneo para definição de alternativas de exploração de um aquífero aluvial. In: VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2002. *Anais do VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. v. Unico. p. 55.
- WANG, H. F.; ANDERSON, M. P (1982). *Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods*. San Diego, California, USA: Academic Press., 237 p.