

# MODELO DE SIMULAÇÃO DE VAZÃO E REBAIXAMENTO PARA AQUÍFEROS SEDIMENTARES ADAPTADO PARA IMAGENS – IMPLEMENTAÇÃO EM PLANILHA ELETRÔNICA.

Mariano da Franca Alencar Neto<sup>1</sup>; Ana Carolina de Carvalho<sup>2</sup>; Jade dos Santos Carmona<sup>3</sup>;  
Francisco Maurício de Sá Barreto<sup>4</sup> & José Sérgio dos Santos<sup>5</sup>

**Resumo** – O presente trabalho implementa a metodologia apresentada por Hames (2005) para o cálculo de vazão e rebaixamento em aquíferos sedimentares. A metodologia discretiza as equações que regem o rebaixamento objetivando sua utilização em imagens bitmaps – mapa de bits. Foi desenvolvido um modelo em planilha eletrônica visando à construção futura de um aplicativo baseado em Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Tal procedimento possibilitou maior compreensão do método, suas limitações teóricas e dificuldades de implementação. Facilitando, inclusive, o trabalho em equipe.

**Abstract** – This work implements the methodology presented by Hames (2005) for the calculation of drawdown in sedimentary aquifers. The methodology presented discretizes the equations governing the drawdown and use bitmap images. We developed an initial model with the methodology proposed for the development of a future application in Geographic Information Systems (GIS). This procedure enabled a greater understanding of the method, its theoretical limitations and difficulties of implementation.

**Palavras Chave** – Sistemas de informações Geográficas (SIG), Aquíferos Sedimentares, Equação de Darcy.

---

<sup>1</sup> Professor do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Construção Civil, [mariano@ifce.edu.br](mailto:mariano@ifce.edu.br)

<sup>2</sup> Bolsista IFCE, Departamento de Construção Civil, [carolina\\_acc@yahoo.com.br](mailto:carolina_acc@yahoo.com.br)

<sup>3</sup> Bolsista IFCE, Departamento de Construção Civil, [jade.s.carmona@gmail.com](mailto:jade.s.carmona@gmail.com)

<sup>4</sup> Professor do IFCE, Departamento de Construção Civil, [barreto@ifce.edu.br](mailto:barreto@ifce.edu.br)

<sup>5</sup> Professor do IFCE, Departamento de Construção Civil, [sergio@ifce.edu.br](mailto:sergio@ifce.edu.br)

## 1– INTRODUÇÃO

O Nordeste brasileiro apresenta taxas de evapotranspiração que facilmente superam as respectivas taxas de precipitação. Como consequência tem-se, em períodos de estiagem, uma rápida diminuição dos volumes das águas superficiais acumulados nos períodos chuvosos. Devido à disponibilidade, qualidade e por não estarem sujeitas a evaporação inclemente, constata-se que o uso e a gestão das águas subterrâneas possuem papel estratégico para a região.

Fatores determinantes para a acumulação de águas subterrâneas são, entre outros, o clima e a geologia. Do ponto de vista geológico, dois grandes grupos litológicos têm destaque: as rochas porosas e as rochas cristalinas. Conforme Bear (1972), tanto em termos de quantidade quanto de qualidade os aquíferos sedimentares merecem destaque.

Cerca de 10% do território nordestino é constituído por rochas sedimentares, que vão compor os aquíferos distribuídos em bacias sedimentares; coberturas costeiras e aluviões (BRASIL DNPM/CPRM, 1981).

Os aquíferos aluviais, de dimensões variadas, compõem uma significativa rede natural de distribuição de água subterrânea das bacias hidrográficas. Há na região Nordeste algo em torno de 32.000 km<sup>2</sup> de coberturas aluviais em condições de fornecer água para dessedentação e irrigação rural, com reservas exploráveis da ordem de 1 a 2 bilhões m<sup>3</sup>/ano (DNAEE/DCRH, 1983/1985).

Neste contexto, modelos de determinação do potencial de abastecimento de aquíferos aluviais assumem um valor estratégico na criação de cenários de consumo e estimativas de recarga, orientando os tomadores de decisão para o uso adequado e racional dessas reservas hídricas.

Atualmente a popularização crescente das ferramentas vinculadas a Sistemas de Informações Geográficas (SIG), em especial o sensoriamento remoto e os modelos digitais de elevação (*Digital Elevation Model* - DEM), tem propiciado avanços significativos na avaliação, caracterização e demarcação de áreas de potencialidade hídrica. Os dados trabalhados por essas técnicas são comumente apresentados na forma de imagens em formato de mapa de bits (Bitmap/Raster), onde cada bit codifica uma informação relevante da área analisada – altitude (topografia), revestimento (vegetação), etc. Existem inúmeras técnicas de processamento digital de imagens que, em última análise, se utilizam da modificação do valor de um dado bit conforme a influência de bits próximos, podendo realçar contornos, criar contrastes ou suavizar descontinuidades.

Técnicas que possibilitem o uso de modelos de simulação acoplados a imagens raster são promissoras, principalmente devido à existência de inúmeras ferramentas já desenvolvidas para tratamento, manipulação e compatibilização dessas imagens.

O presente trabalho foi fundamentado na metodologia apresentada por Hames (2005) para avaliar a disponibilidade hídrica de águas subterrâneas em aquíferos sedimentares do semi-árido

nordestino. O método proposto é baseado na adequação da equação de Darcy/Theim às imagens raster.

Apesar do trabalho está focado em aquíferos aluviais o estudo foi desenvolvido para os casos confinado e livre, possibilitando a aplicação da metodologia em aquíferos sedimentares diversos.

## **2– OBJETIVOS**

### **2.1 Principal**

O objetivo deste trabalho é a construção de um modelo para a caracterização de curvas de mesma vazão em função do rebaixamento em aquíferos sedimentares, baseado na adaptação do método proposto por Hames (2005).

### **2.2 Específicos**

- Identificar os processos básicos de manipulação de pixels, conforme a metodologia proposta.
- Desenvolver um modelo didático que sirva de ponto de partida para um aplicativo baseado em SIG livre de código aberto.
- Identificar limitações do método adotado.

## **3– METODOLOGIA**

De acordo com Hames (2005), o movimento de água subterrânea na direção de um poço de extração é controlado pelo gradiente hidráulico e é governado pela lei de Darcy (1856). A alimentação do poço é realizada através das fronteiras de um cone de depressão criado pelo bombeamento.

Em um determinado ponto do aquífero se as componentes do gradiente hidráulico que causam o escoamento subterrâneo em direção a este (componentes positivas) forem maiores que aquelas que fazem a água se distanciar (componentes negativas), o ponto é considerado como “ponto de ganho”. Por outro lado, o ponto é considerado como “ponto de perda” se as componentes negativas são maiores. O fluxo ( $Q_{net}$ ) representa a diferença entre as componentes positivas e negativas.

Em resumo, considerando o equilíbrio para uma superfície piezométrica local, um poço de descarga não deve exceder a rede de fluxo positiva local.

Em termos de grandes períodos, se a recarga não for suficiente para substituir a retirada global, a superfície freática pode rebaixar consideravelmente em pontos distantes do bombeamento.

O fluxo de retirada (poço de descarga,  $Q_{out}$ ) para escoamento radial permanente pode ser obtido pela resolução da equação de Darcy (forma radial). Se esta equação é integrada do raio do poço ( $r_w$ ) até o raio referente ao cone de depressão ( $r_{eff}$ ) e da carga hidráulica no poço ( $h_w$ ) até a profundidade original da carga hidráulica ( $H$ ), a equação resulta:

**Para aquíferos confinados:**

$$Q_{out} = 2\pi K b \frac{h_w - H}{\ln \frac{r_w}{r_{eff}}} \quad (1)$$

em que  $K$  é a condutividade hidráulica e  $b$  é a espessura do aquífero.

Se  $S_w$  é o rebaixamento no poço de bombeamento e  $S_w = H - h_w$ , a equação (1) pode ser reescrita na forma seguinte forma, em termos de  $S_w$ :

$$Q_{out} = 2\pi K b \frac{-S_w}{\ln \frac{r_w}{r_{eff}}} \quad (2)$$

O escoamento lateral que alimenta o poço de bombeamento pode ser estimado pela aplicação da lei de Darcy:

$$q = K b \frac{dh}{dl} \quad (3)$$

em que  $h$  é a carga piezométrica e  $l$  é a uma distância.

Visando o uso de SIG, foram consideradas janelas de 3x3 células em uma imagem *raster*, numeradas conforme a Figura 1. Observa-se que a célula central  $x$  sofrerá a influência das demais células  $i$  (1,2,...,8) ao seu redor, e será para esta célula ( $x$ ) que o valor de  $Q_{net}$  será obtido.

1	2	3
8	x	4
7	6	5

**Figura 1 – Janela de 3x3 células.**

Para a formulação foi assumido que  $\lambda = \frac{dh}{dl}$ , então o escoamento lateral positivo na direção radial do poço ( $Q_{+ve}$ ) pode ser calculado como:

$$Q_{+ve} = 2\pi r_{eff} \frac{\sum_{i=1}^8 \bar{K}_l \bar{b}_l \lambda_i}{N} \quad (4)$$

A equação (4) é aplicada apenas às células com  $\lambda_i$  positivos, onde  $\bar{K}_l = \frac{K_i + K_x}{2}$ ,  $\bar{b}_l = \frac{b_i + b_x}{2}$ ,  $\lambda_i = \frac{h_i - h_x}{l}$ , e  $N$  é o número de células positivas  $\lambda_i$  encontradas.

Observa-se que o índice  $i$  do somatório diz respeito à posição das células ao redor da célula  $x$ , contribuindo para o somatório somente aquelas que apresentarem  $\lambda_i > 0$ . Ou seja,  $i$  é uma variável que representa o número de células ao redor da célula central em uma janela de 3x3, com valores entre 1 e 8, e  $dl$  é distancia entre os centros das células (célula central) e a célula  $i$ .

O fluxo lateral negativo ( $Q_{-ve}$ ) pode ser calculado da mesma maneira, mas para células com valores  $\lambda_i$  negativos.

Assim, a determinação do fluxo de rede ( $Q_{net}$ ) deve incluir a diferença entre o fluxo lateral positivo e negativo, para o qual  $Q_{net} = Q_{+ve} - Q_{-ve}$ , logo:

$$Q_{net} = 2\pi r_{eff} \chi_i \quad (5)$$

Onde  $\chi_i$  pode ser escrito como:

$$\chi_i = \frac{\sum_{i=1}^8 \bar{K}_l \bar{b}_l \lambda_i}{N} \Big|_{+ve} - \frac{\sum_{i=1}^8 \bar{K}_l \bar{b}_l \lambda_i}{N} \Big|_{-ve} \quad (6)$$

No equilíbrio,  $Q_{net}$  deve ser igual a  $Q_{out}$ ;

Portanto, as equações (2) e (5) levarão à:

$$r_{eff} = \frac{-K_i b_i}{\chi_i} \frac{S_w}{\ln \frac{r_w}{r_{eff}}} \quad (7)$$

O valor de  $r_{eff}$  é resolvido para cada célula assumindo-se um valor inicial para a variável no lado direito da equação (7) e iterando até uma tolerância satisfatória ser alcançada.

Uma vez determinado  $r_{eff}$  para uma dada célula, o máximo valor permitido da taxa de bombeamento pode ser calculado a partir da equação ( 5 ).

Uma célula é considerada “célula de perda” se a taxa calculada for negativa; Portanto, nenhum bombeamento será permitido a partir dela. Pelo outro lado, se a taxa calculada é positiva, esta representa a taxa de bombeamento máximo permitido a partir daquela célula.

### **Para aquíferos Livres**

Para aquíferos livres o procedimento para o cálculo da taxa de bombeamento a partir de cada célula é similar ao dos aquíferos confinados. Entretanto, a espessura saturada do aquífero não é mais representada por  $b$  e sim pela própria carga hidráulica  $h$ , ao se integrar a equação de Darcy radialmente e considerando o cone de rebaixamento com o raio  $r_{eff}$ , tem-se:

$$Q_{out} = \pi K \frac{-2hS_w + S_w^2}{\ln \frac{r_w}{r_{eff}}} \quad (8)$$

Além disso, adotando um valor médio para  $h$ ,  $\bar{h}_1 = \frac{h_i + h_x}{2}$ , o valor de  $\chi_i$  pode ser reescrito conforme:

$$\chi_i = \frac{\sum_{i=1}^8 \bar{K}_l \bar{h}_l \lambda_i}{N} \Big|_{+ve} - \frac{\sum_{i=1}^8 \bar{K}_l \bar{h}_l \lambda_i}{N} \Big|_{-ve} \quad (9)$$

E finalmente,  $r_{eff}$  pode ser calculado conforme a equação:

$$r_{eff} = \frac{K_i}{2\chi_i} \frac{-2h_i S_w + S_w^2}{\ln \frac{r_w}{r_{eff}}} \quad (10)$$

O valor de  $r_{eff}$  é resolvido para cada célula pela adoção de um valor inicial qualquer e iteragindo até uma tolerância pré-determinada ser alcançada. Uma vez determinado  $r_{eff}$  para cada célula, o respectivo máximo permitido de taxa de bombeamento pode ser calculado da mesma forma a partir da equação ( 5 ).

## **4 – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL**

A metodologia apresentada foi implementada inicialmente em planilhas Excel, representando um modelo onde os dados obtidos tanto na implementação como nas as iterações estão disponíveis para análise.

Dois arquivos foram desenvolvidos conforme as formulações para aquíferos livres e confinados. Em cada modelo foi reservado um espaço de 484 (22 x 22) células, Figura 2. A área reservada foi aplicada em 29 pastas acopladas, conforme:

1. Dados de entrada:

- 1 pasta para condutividade hidráulica ( $K_i$ )
- 1 pasta para espessura saturada do aquífero – ( $b_i$  para confinado e  $h_i$  para livre)

2. Dados Calculados:

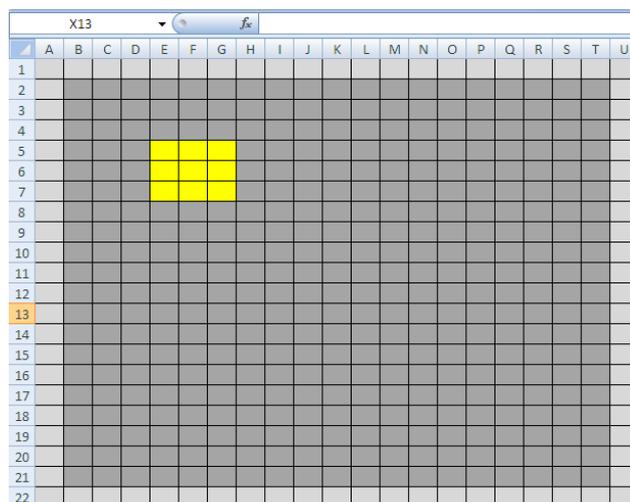
- 8 pastas para contribuição positiva do fluxo
- 8 pastas para contribuição negativa do fluxo
- 1 pasta para cálculo de  $Q_{+ve}$
- 1 pasta para cálculo de  $Q_{-ve}$
- 1 pasta para cálculo de  $X_i$
- 8 pastas de iteração para cálculo do raio efetivo  $r_{eff}$
- 1 pasta para valores finais da vazão  $Q_{net}$ .

3. Gráfico

- 1 pasta com gráfico final da vazão  $Q_{net}$ .

Cada célula na área reservada (22x22) está referenciada igualmente em todas as pastas, guardando, portando, dados de entrada ou calculados referentes àquela célula específica (que simboliza o pixel na imagem raster).

Uma pasta, ainda, foi reservada para conter os dados comuns a todas as células: raio do poço, raio efetivo inicial e rebaixamento. Totalizando 30 pastas para cada modelo.



**Figura 2 – Células reservadas em cada planilha simbolizando os pixels de imagens raster.**

As equações apresentadas na metodologia foram aplicadas em cada célula da área reservada conforme as respectivas pastas citadas anteriormente.

## 5- RESULTADOS

A área de estudo apresentada por Hames (2005) foi analisada pelo modelo desenvolvido para uma malha de 22x22 células.

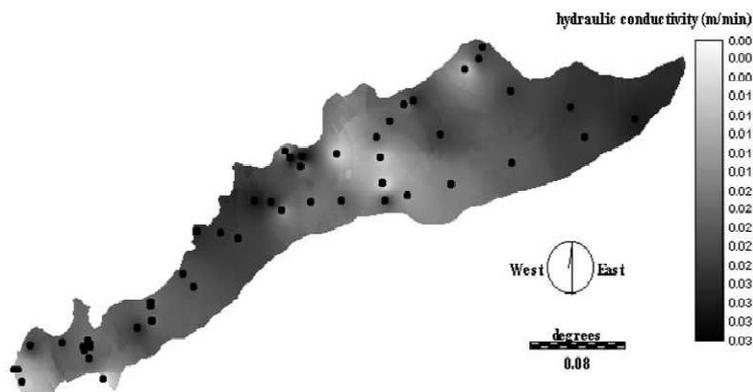


Figura 3 – Distribuição da Condutividade Hidráulica no aquífero de Hada Al-Sham.

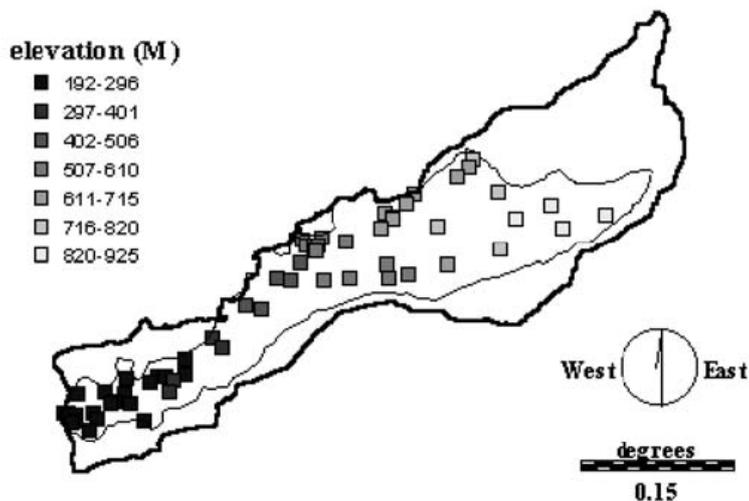
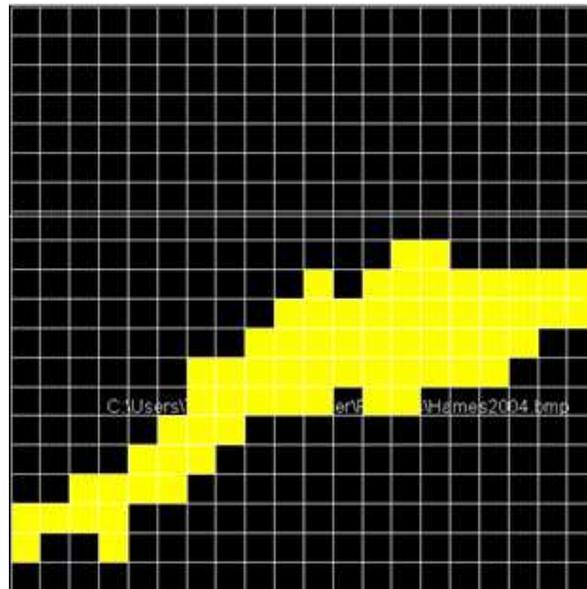


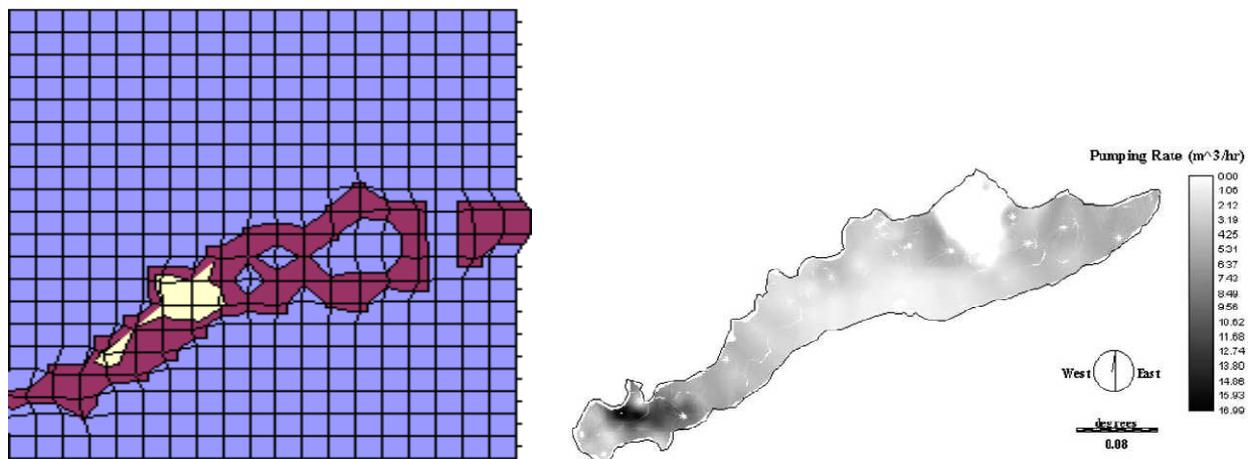
Figura 4 – Nível piezométrico no aquífero de Hada Al-Sham.  
Contorno mais fino limita o aquífero e o contorno mais grosso a bacia hidrográfica



**Figura 5 – Malha discretizada para o aquífero Hada Al-Sham.**

A bacia em estudo ocupou uma área referente a 66 células, Figura 5, ficando as demais inativas no modelo. A condutividade hidráulica para cada uma das 66 células ativas foi aproximada a partir do mapa da Figura 3, e a carga piezométrica a partir do mapa da Figura 4.

Um gráfico simulou o comportamento da vazão de retirada máxima do aquífero, considerando o rebaixamento de 1m, Figura 6.



**Figura 6 – Superfície da taxa máxima de bombeamento obtida para cenário de rebaixamento de 1m. Lado esquerdo simulação do modelo estático. Lado direito resultado de Hames (2005).**

## 6– CONCLUSÃO

Conforme a metodologia abordada, os gráficos apresentados sugerem que quanto maior a vazão de retirada de água do aquífero, menor será a área de exploração de água subterrânea do mesmo. Desse modo, para que o aquífero permaneça em equilíbrio, o  $Q_{net}$  (vazão máxima de retirada) não deve ultrapassar o valor correspondente ao estabelecido para àquela área de exploração.

A simulação no Excel indicou regiões compatíveis com a apresentada por Hames, apesar do modelo ter sido aplicado em uma malha grosseiramente espaçada impossibilitando uma comparação mais apurada dos resultados.

Do ponto de vista da implementação, a construção do modelo em uma planilha eletrônica possibilitou o monitoramento de todas as variáveis envolvidas célula a célula, conseqüentemente uma maior compreensão do modelo teórico em si. A planilha serviu de importante etapa visando a implementação final do método em sistemas de informações geográficas.

O caráter didático do desenvolvimento do modelo em planilhas pode ser sentido, sobretudo, nas análises em equipe, facilitando decisões importantes para os passos posteriores do estudo. Por exemplo, a escolha do arranjo de classes em uma aplicação futura do método por meio de programação orientada a objetos (POO).

## 7–CONSIDERAÇÕES FINAIS

Simuladores computacionais assumem importância crescente no âmbito da caracterização, monitoramento, exploração e, sobretudo, na compreensão do movimento das águas subterrâneas, Rebouças (2002).

Aliar os métodos e técnicas de simulação às ferramentas de sensoriamento remoto surge como um campo promissor de pesquisa.

Esse trabalho inicial aponta para aprofundamento da metodologia apresentada com identificação das dificuldades de implementação e de possíveis inconsistências teóricas.

O uso de SIG livre e de código aberto para a implementação final da metodologia se encontra em fase de desenvolvimento. Neste caso, a escolha recaiu na linguagem JAVA, com abordagem por programação orientada a objetos e por meio de um plug-in acoplado ao aplicativo JUMP (*Java Unified Mapping Platform*). O JUMP uma interface gráfica amigável e excelente documentação (FRANCA ALENCAR, 2008). Dentre as características técnicas do JUMP, segundo Uchoa (2004), pode-se citar:

- É um software SIG de código aberto;

- Possui ferramentas completas para manipulação de feições (visualização, edição e criação);
- Trabalha nativamente com arquivos em formato ESRI® SHAPEFILES e GML;
- Suporte ao POSTGIS através de PLUGIN.

Outro desdobramento importante é a análise da metodologia proposta à luz de experimentos de campo que possam comprovar os resultados obtidos ou orientar ajustes e correções necessárias.

## 8– BIBLIOGRAFIA

BEAR, J. **Hydraulics of Groundwater**. New York : Dover, 1972. 764 p.

BRASIL. DNPM/CPRM. **Mapa hidrogeológico do Brasil: escala 1:250.000**. Relatório final. Recife: CPRM. 1981. 2 v.

DARCY, H. **Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon - Appendice D**. Paris: Dalmont, 1856.

DNAEE-DCRH. **Transposição das águas do São Francisco e Tocantins para o semiárido nordestino: Avaliação Preliminar**. MME/DNAEE-DCRH. Brasília. 1983-1985. 72 p.

FRANCA ALENCAR, Mariano. **Interpolação por Splines para Modelação de Inomogeneidades no Método de Elementos Analíticos – Implementação Por Programação Orientada a Objetos**. São Carlos: EESC-USP, 2008. p. 214. Tese Doutorado, 2008. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/>

HAMES, A. S. El- Determination of groundwater availability in shallow arid region aquifers utilizing GIS technology: a case study in Hada Al-Sham, Western Saudi Arabia. **Hydrogeology Journal** , 2005, vol. 13, p. 640–648.

REBOUÇAS, A. C. A Inserção da Água Subterrânea no Sistema Nacional de Gerenciamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 7, 4, p. 39-50, 2002.

UCHOA, H. N.; FERREIRA, P. R. **Geoprocessamento com Software Livre.**, 2004, p.16. Disponível em: [www.geolivres.org.br](http://www.geolivres.org.br).