

MODELAGEM DO EFEITO DE BOMBEAMENTO NA DEPLEÇÃO DE RIOS. SIMULAÇÕES DE UM CASO REAL NO OESTE DA BAHIA

Hans Dieter Max Schuster¹; José Leonardo Ferreira da Cruz² & Fernando Fernandes da Silva³

RESUMO --- Este trabalho apresenta várias modelagens computacionais do efeito de bombeamento extenso na depleção de rios numa área de estudo localizada no aquífero arenito de Urucuia no oeste do Estado da Bahia. Nesta área com dois rios hidráulicamente conectados e gradientes hidráulicos naturais, calculou-se tanto a componente de infiltração induzida dos rios como a redução dos seus fluxos de base. Com base dos dados hidrogeológicos determinados por alguns testes de poço realizados no ano de 2003 pela Superintendência de Recursos Hídricos da Bahia (SRH-Bahia), a área de estudo foi simulada numericamente sob diferentes gradientes hidráulicos e diversas esquemas de bombeamento de longa duração. O estudo encerra com uma simulação transiente do bombeamento excessivo e longa duração sob aspecto de presença e ausência de rios.

Os resultados indicam que o uso de modelagem matemática ajuda a entender melhor a complexa interação hidrológica do sistema rio-aquífero-poço e fornece informações importantes para o gerenciamento e gestão dos recursos hídricos numa bacia hidrográfica.

Unitermos: Depleção de rio; modelagem numérica; água subterrânea.

MODELING OF STREAM DEPLETION EFFECTS FROM GROUND-WATER PUMPING. REAL CASE SIMULATIONS IN THE WESTERN PART OF BAHIA STATE.

ABSTRACT --- The present work presents various simulations of stream-aquifer depletion models for groundwater management and decision support. To achieve these objectives numerical modeling techniques were used for a selected study area in a real sandstone aquifer (Urucuia aquifer located in the western part of Bahia state) with its two hydraulically connected streams to analyze depletion effects, both the induced stream infiltration and the reduced baseflow, which are produced by pumping wells located in the vicinity of rivers.

Based on the hydraulic parameters determined from well tests done by the water agency of Bahia state in 2003, the study area was simulated for different hydraulic gradients under varying well pumping scheme and special long term pumping periods. The study is concluded with a transient simulation of an excessive pumping schedule and an analysis of drawdown of the ground-water level in the surrounding area with and without the presence of rivers.

The present work is useful for understanding the hydrologic interactions between stream and aquifer in areas where groundwater quantity and quality are of great concern and provides useful information for the development of water resources management plans.

Uniterms: Stream depletion; numerical modeling; ground-water.

¹ Professor Associado da Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia (UAMG), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande - Paraíba, CEP: 58109-970, Fone/Fax: 083-2101.1169, didischuster@yahoo.de

² Técnico do Instituto de Gestão das Águas e Clima (INGÁ - Salvador-Bahia)

³ Consultor do Instituto de Gestão das Águas e Clima (INGÁ - Salvador-Bahia)

INTRODUÇÃO

Investigações recentes indicam que a exploração global das águas subterrâneas para fins de irrigação cresceu enormemente nas últimas duas décadas e irá continuar a crescer no futuro, especialmente nas regiões áridas e semi-áridas. Conflitos têm ocorrido entre grupos de usuários de água subterrânea e de água superficial; conseqüentemente, é essencial determinar uma retirada permissível para cada grupo de usuário, definida através da outorga dos recursos hídricos, para que haja um adequado gerenciamento sobre os direitos de uso da água dos sistemas rio-aquífero.

Quando um poço em bombeamento está próximo a um rio, que está hidraulicamente conectado com o aquífero, ele divide o fluxo de água subterrânea, que sob condições naturais, descarrega como o fluxo de base ao rio. O resultado é uma redução do fluxo de base ao rio (*baseflow reduction*). Se as retiradas são continuadas por longos períodos, a descarga de água subterrânea ao rio pode ser interrompida ao desenvolver-se um gradiente hidráulico reverso ao redor do rio e a água (às vezes poluída) pode ser induzida a mover-se do rio para o aquífero (*induced stream infiltration*). Este fato deve ser considerado onde os rios contêm águas poluídas ou onde o fluxo está comprometido.

A soma destas duas parcelas, redução do fluxo de base e infiltração induzida de rio, é comumente chamada de depleção total de um rio (*total stream depletion*), sendo bastante importante, principalmente para pequenos rios. Geralmente, rios alimentados por aquíferos são comuns, mas as taxas de depleção afetam a quantidade e a qualidade do fluxo dos rios, especialmente durante os períodos de estiagem.

As primeiras descrições concisas na resposta de um aquífero a retiradas dos poços foram trabalhos baseados nos modelos analíticos simplificados apresentados por Theis (1941), Glover e Balmer (1954), Hantush (1965) e, recentemente, por Hunt (1999). Hoje em dia, modelos matemáticos computacionais são mais adequados e utilizados em virtude da grande complexidade hidrogeológica do sistema real de rio-aquífero e trabalhos baseados nos modelos numéricos são apresentados por Sophocleous et al. (1995), Butlar et al. (2001), Chen e Yin (2001) e Chen e Yin (2004).

O objetivo desse estudo foi analisar os impactos prejudiciais que podem comprometer o fluxo de rios e outros mananciais superficiais devido ao bombeamento excessivo e de longo prazo através de múltiplos poços implantados nas fazendas situadas na região da Bacia do Rio São Francisco no oeste do Estado da Bahia. Como área de estudo foi selecionada uma fazenda, que pediu outorga de oito poços para fins de irrigação na Superintendência de Recursos Hídricos (SRH/BA) em Salvador. Trata-se de uma propriedade limitada lateralmente por dois rios, onde estão instalados oito (8) poços de produção que fornecem água para os oito (8) pivôs centrais, cobrindo áreas de 100 hectares cada um, com uma vazão de aproximadamente 600 m³/h e com tempo de bombeio médio de 18 horas por dia nos meses de rega. Foram determinadas em diversas simulações numéricas as respectivas taxas de depleção sob estas condições de bombeamento excessivo e de longa duração dos múltiplos poços.

Experimentos de campo que poderiam ser utilizados na avaliação dos modelos existentes, infelizmente são escassos. Hunt et al. (2001) executaram na Nova Zelândia um teste de bombeamento ao longo de um pequeno rio com uma taxa de fluxo menor que 0,05 m³/s para determinar o parâmetro da condutividade hidráulica do material do leito do rio.

ESTUDO DE UM CASO REAL

O presente trabalho apresenta vários estudos de campo e simulações numéricas baseadas nos dados hidrogeológicos adquiridos no ano de 2003 pela Superintendência de Recursos Hídricos da Bahia (SRH, Schuster, 2003) realizados na Fazenda Campo Aberto no oeste do Estado da Bahia situada na área do Chapadão Urucuia, que faz parte da Bacia do Rio São Francisco. A chapada do Urucuia é o principal divisor de águas superficiais e subterrâneas entre as Bacias do Rio São Francisco e Rio Tocantins e é uma região de relevo aplainado com área de 80.000 km² aproximadamente com altitudes variando suavemente de 900 a 1000 metros no Estado de Goiás, até 600 a 650 metros no Estado da Bahia. Sua rede de drenagem com rios perenes e afluentes da margem esquerda do São Francisco tem um padrão retilíneo de cursos predominantemente paralelos, tectonicamente orientados em direção de oeste-sudoeste para leste-nordeste.

A Fazenda Campo Aberto encontra-se na sub-bacia hidrográfica do Rio de Janeiro do Grupo Urucuia de idade Cretáceo Inferior. O Grupo Urucuia é sedimentar com uma espessura da ordem de 400 metros que

se sobrepõe, em discordância erosional, sobre os calcários do Grupo Bambuí ou, eventualmente, sobre as rochas cristalinas do embasamento gnáissico-migmatítico de idade Proterozoica (Figura 3)

A análise dos perfis litológicos dos poços (Schuster 2002a, 2002b) mostra que a porção superior de seqüência arenosa do Urucuia, denominada Formação Serra das Araras, é constituída por arenitos do topo, que apresentam níveis silicificados e fraturados, com espessuras variando entre 80 e 150 m, aproximadamente. Sotoposta a esses arenitos superiores encontra-se a Formação Posse constituída por arenitos finos, homogêneos, avermelhados e notadamente friáveis, com espessura de 250 a 400 m. Com base nessa caracterização litológica, pode-se supor que na parte superior (Formação Serras das Araras) predominam os arenitos compactos com porosidade dupla principal por fraturas e, na parte inferior (Formação Posse) predominam os arenitos finos e friáveis com porosidade primária, tipicamente intergranular.

A vegetação primária no Chapadão do Urucuia é a de campos cerrados, mas a área da bacia hidrográfica do Rio de Janeiro, todavia, está quase completamente substituída por plantações extensivas de soja, café e algodão; agricultura mecanizada, com irrigação contínua, por pivôs que abrangem cada um cerca de 100 hectares e são abastecidos através de mananciais superficiais e de poços tubulares profundos instalados na camada espessa inferior da Formação Posse. Este desenvolvimento agropecuário dos últimos 20 anos provavelmente já causou alterações visíveis do meio ambiente, sendo o responsável pela redução das vazões em alguns trechos de curso perene dos rios. Observações recentes em poços existentes na região da bacia hidrográfica do Chapadão de Urucuia mostraram que houve um rebaixamento em torno de 2 m no nível estático da água subterrânea nos últimos 5 anos. Porém, não se pode concluir que isto representa o comportamento de toda a bacia hidrográfica do Chapadão do Urucuia.

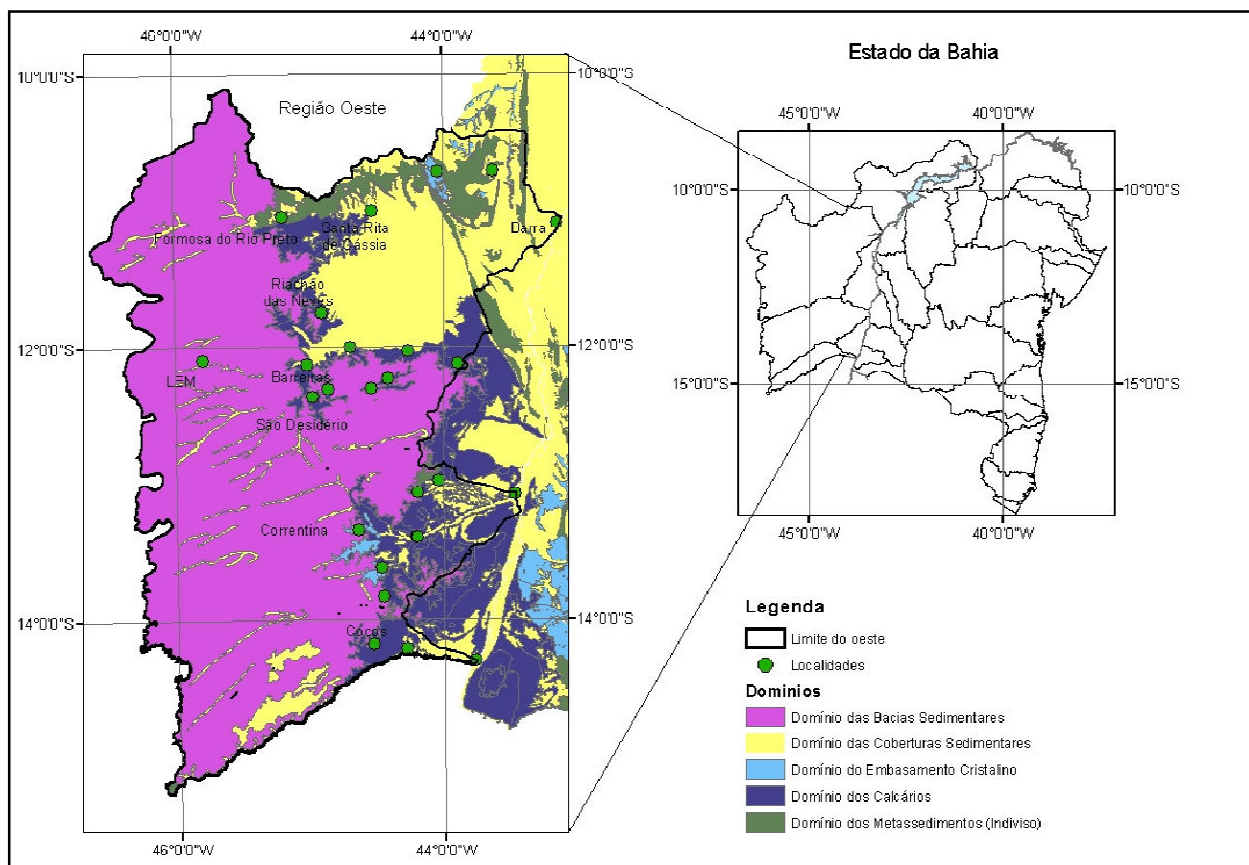


Figura 1 – Mapa do Oeste da Bahia com sua geologia regional e a localização da área de estudo.

Assim, estes estudos tiveram por objetivo, na primeira etapa, a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos da formação Posse, o principal aquífero para o suprimento hídrico dos poços tubulares da região, bem como, logo a seguir, a simulação numérica do fluxo subterrâneo do sistema rio-aquífero-poço para analisar as possíveis evidências da interação entre os rios existentes na área da Fazenda Campo

Abertos e o respectivo aquífero e, as conseqüências ambientais no nível de água frente à exploração pela bateria dos poços múltiplos. A Fazenda Campo Aberto foi adotada como área piloto no Estado da Bahia em virtude de ter feito um pleito junto a SRH para perfuração de 8 poços tubulares profundos. O estudo foi desenvolvido em virtude do órgão não ter respostas sobre questões fundamentais, tais como:

- Quais são os efeitos prejudiciais devido ao bombeamento excessivo nos níveis de água subterrânea e, em conseqüências, nas vazões dos rios no Aquífero Urucuia?
- Qual é a taxa máxima aceitável de retirada per poço tubular no Aquífero Urucuia com respeito a não-comprometimento dos rios mais pertos?
- Qual é a duração de bombeamento contínuo aceitável até aparecerem efeitos de agravamento nas vazões dos rios?
- Qual é a menor distância aceitável entre o poço e o rio mais perto?
- Qual é a menor distância aceitável entre os poços em bombeamento para evitar uma interferência entre seus cones de depressão?

Uma avaliação de um possível impacto dos poços em bombeamento na área da Fazenda Campo Aberto, que é circundada por dois rios (Rio Limpo e Rio de Janeiro), foi feita pela primeira vez em 2003, quando equipe técnica da SRH acompanhou o trabalho de perfuração e executou vários testes de produção de poço e testes de aquífero. O interesse principal foi conhecer os raios de interferência dos poços e as taxas de infiltração dos rios circundantes nesta área de estudo, onde 8 poços de produção com altas taxas de bombeamento (cada poço poderá retirar água em torno de 500 m³/h) foram instalados. Por isso, foi utilizado um modelo hidrogeológico mais realista, considerando uma diferença na carga hidráulica entre os rios e o respectivo aquífero e um gradiente hidráulico ambiental. Com base neste modelo foram simuladas diversas situações, tais como um regime de bombeamento de um poço bem como em conjunto de dois, de quatro e de até de 8 poços.

TRABALHOS DE CAMPO

Na Fazenda Campo Aberto foram instalados oito (8) poços nos últimos anos para suprir diversos pivôs centrais (Fig.2). Cada pivô irriga uma área de cultivo de cerca de 100 hectares durante seis meses ou mais em regime contínuo de 18 horas de duração por dia. Eles são desligados nos meses chuvosos. A taxa de irrigação representa em média uma chuva artificial de 12 milímetros por dia. Para conseguir isso, a vazão de cada poço produtor é, em média, de 500 a 600 m³/hora/poço. Nesta seção são apresentados os resultados dos trabalhos de campo realizados na Fazenda Campo Aberto no ano de 2003 (Schuster, 2003) com o objetivo de determinar os parâmetros hidrodinâmicos da área de estudo. A figura 3 mostra uma representação esquemática do sistema hidrogeológico rio-aquífero-poço da área de estudo com suas três (3) unidades hidrogeológicas com as suas respectivas espessuras encontradas e registradas nos perfis litológicos obtidos pela perfuração dos oitos poços no ano de 2003. A área de estudo é praticamente plana a olho nu, mas a partir de um levantamento topográfico realizado no passado e dos níveis estáticos medidos nos oito poços, existe um gradiente natural (i), que tem que ser assumido no modelo de simulação. Para executar o teste de bombeamento no ano de 2003, o poço P1 com uma profundidade perfurada de $p = 275$ m foi escolhido por ser monitorado através de 2 poços de observação: (1) piezômetro O1a instalado na Formação Posse com uma profundidade: perfurada de $p = 150$ m e uma distancia ao poço P1 de $r = 80$ m e, (2) piezômetro O1b instalado na Formação Serra das Araras com uma profundidade perfurada de $p = 50$ m e uma distância ao P1 de $r = 200$ m.

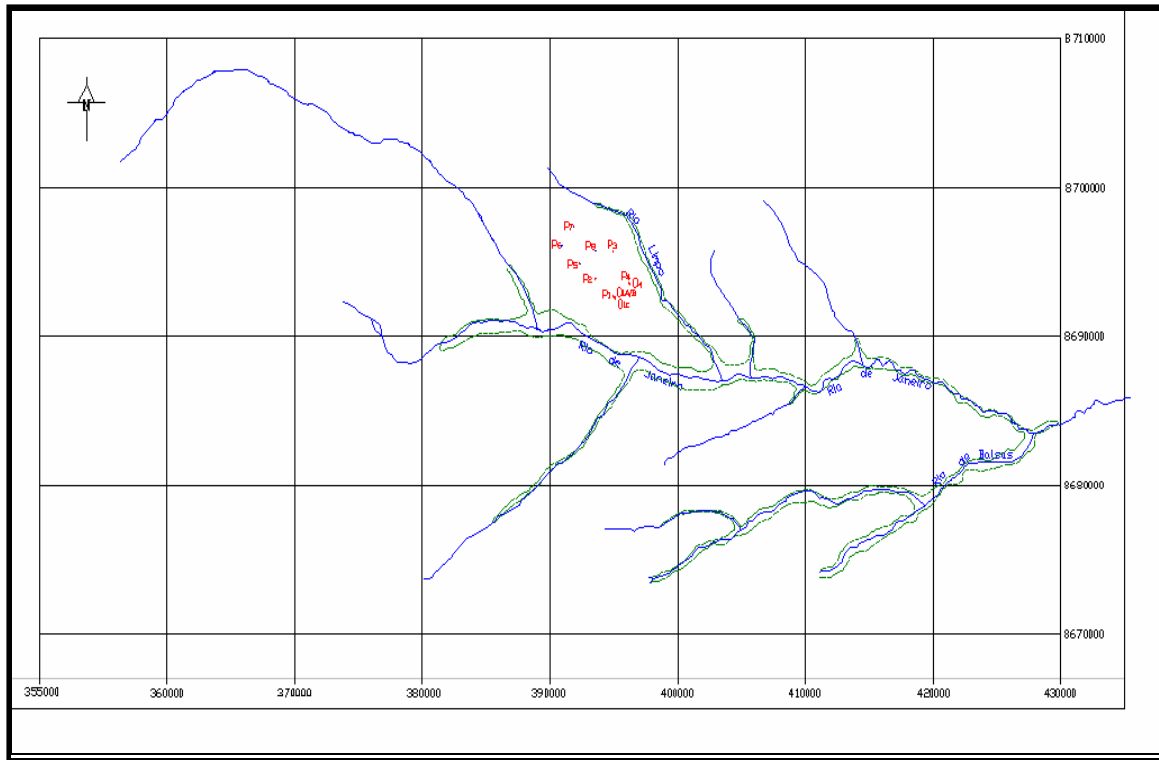


Figura 2 – Área de estudo incluindo a Fazenda Campo Aberto e seus oito (8) poços produtores (Fonte: Schuster, 2003).

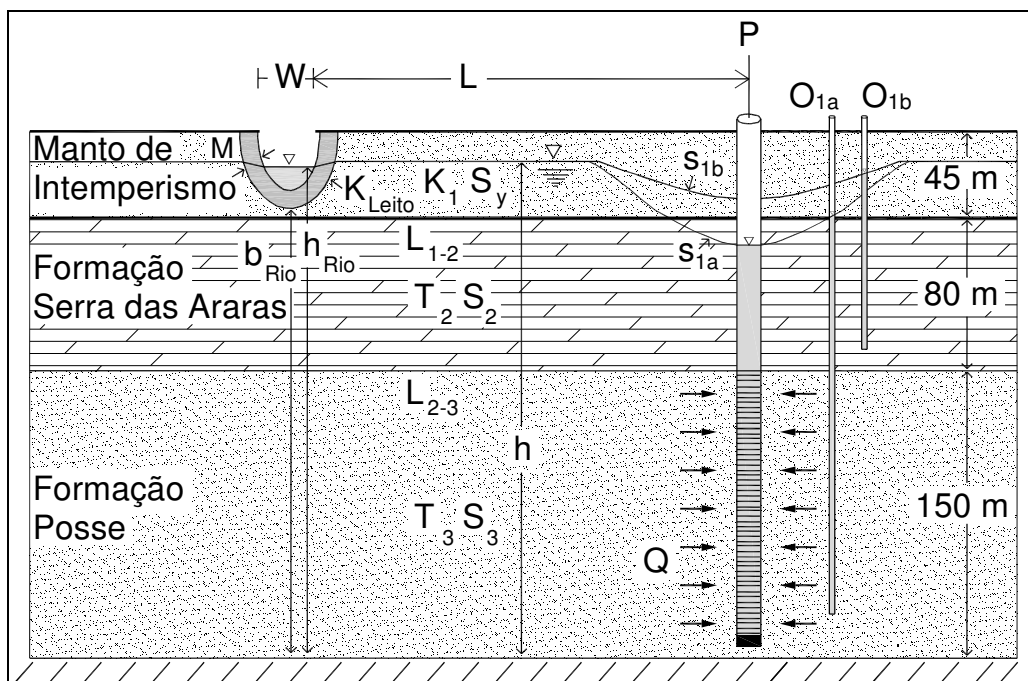


Figura 3 – Representação esquemática mostrando o sistema de rio-aquífero-poço na área de estudo.

Os parâmetros hidrodinâmicos na área de estudo foram determinados através da análise de teste de bombeamento realizado no ano de 2003. O poço de produção P1 foi bombeado por 18 horas com uma taxa de retirada constante de $Q_w = 542 \text{ m}^3/\text{h}$. Os rebaixamentos foram medidos nos dois poços de observação (O1a e O1b). Os parâmetros hidrodinâmicos foram ajustados através do programa PEST (*Parameter Estimation*) do PMWIN com base do modelo 3-D composto de 3 camadas (Schuster, 2003). As curvas de rebaixamento medidas e ajustadas pela PEST e PMWIN são apresentados na Figura 4 e os respectivos parâmetros ajustados na Tabela 1.

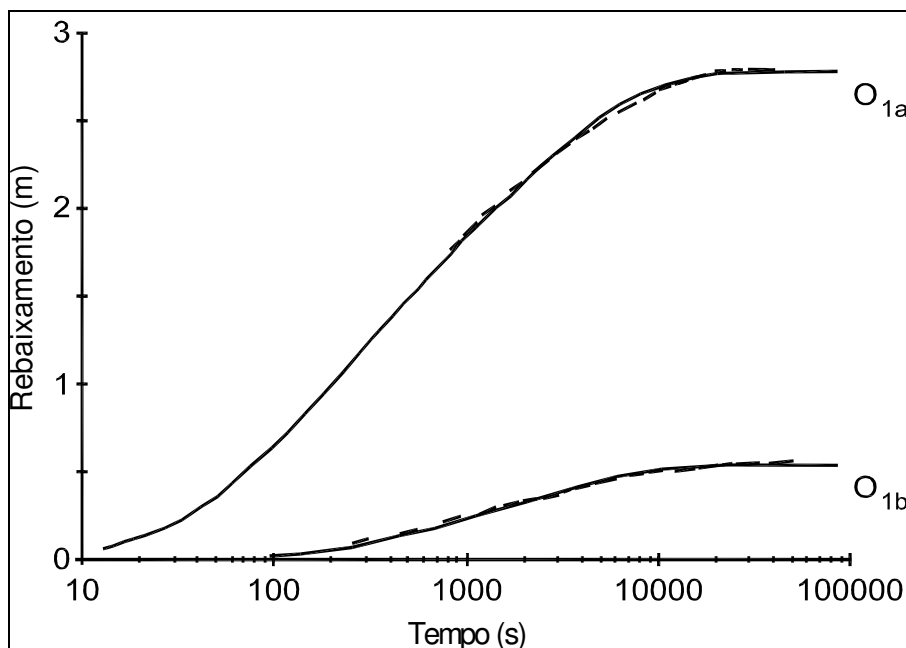


Figura 4 – Curvas de rebaixamentos devido ao bombeamento no poço P1 observados (linha pontilhada) e ajustados (linha contínua) na formação Posse (O1a) e na formação Serra das Araras (O1b) (Fonte: Schuster, 2003).

Tabela 1 – Parâmetros hidrodinâmicos ajustados da Formação Serras das Araras e da Formação Posse. O fator de convergência na otimização automática pelo PEST foi $\phi = 2,04 \cdot 10^{-2}$ (Fonte: Schuster, 2003).

Parâmetro	Segundos	Horas	Dias
Parâmetros hidrodinâmicos da Formação Serras das Araras			
T(1)	9.886E-2 [m ² /s]	355.9 [m ² /h]	8546.5 [m ² /d]
S(1)		7.592E-7 [-]	
L(1-2)	1.160E-7 [1/s]	4.176E-4 [1/h]	1.002E-2 [1/d]
K _{Rio}	4.06E-5 [m/s]	1.46E-1 [m/h]	3.51 [m/d]
Parâmetros hidrodinâmicos da Formação Posse			
T(2)	1.652E-2 [m ² /s]	59.5 [m ² /h]	1427.3 [m ² /d]
S(2)		2.872E-4 [-]	
Q _{Poço - P1}	0.16 [m ³ /s]	576 [m ³ /h]	3456 [m ³ /d]

MODELAGEM NUMÉRICA

Neste estudo, as modelagens numéricas do sistema rio-aquífero-poço foram feitas com o processador PROCESSING MODFLOW PRO (Chiang, 2005) baseado no programa MODFLOW (McDonald e Harbaugh, 1988). Foram simuladas com emprego do programa PMWIN seis (06) situações diferentes em função do gradiente hidráulico (Cruz, 2006). No modelo 01 os dois rios circundantes (Rio de Janeiro e Rio Limpo) estavam em equilíbrio com o aquífero, isto é, $\Delta h = 0$ m, enquanto nos modelos 02, 03, 04, 05 e 06 os dois rios foram considerados efluentes, ou seja, os níveis da superfície dos rios foram rebaixados de $\Delta h = 0,3$ m a partir da superfície do aquífero.

- Modelo 01 com rio em equilíbrio com aquífero ($\Delta h = 0$ m) e gradiente hidráulico $i = 0$.
- Modelo 02 com rio efluente ($\Delta h = 0,3$ m) e gradiente hidráulico $i = 0$.
- Modelo 03 com rio efluente e gradiente hidráulico $i = 1e-4$
- Modelo 04 com rio efluente e gradiente hidráulico $i = 2,5e-4$
- Modelo 05 com rio efluente e gradiente hidráulico $i = 5e-4$
- Modelo 06 com rio efluente e gradiente hidráulico $i = 1e-3$

A área de domínio da modelagem numérica se estende na direção horizontal (Oeste – Leste) com 21.250 m e na direção vertical (Norte-Sul) com 17.750 m, isto é uma área total de 377 km². A discretização dessa área em 219 colunas e 202 linhas foi feita por uma malha retangular de 250 metros nas duas dimensões e foi refinada começando de 100 até 50 m na região dos 08 poços instalados na área de estudo. As figuras 5 e 6 apresentam dois mapas das redes de fluxo selecionados e representativos dos 6 cenários executados, tanto horizontais quanto verticais, que resultam da simulação transiente no final de 185 dias de bombeamento em quatro poços (P1, P3, P5 e P7) para o modelo 01 e o modelo 05.

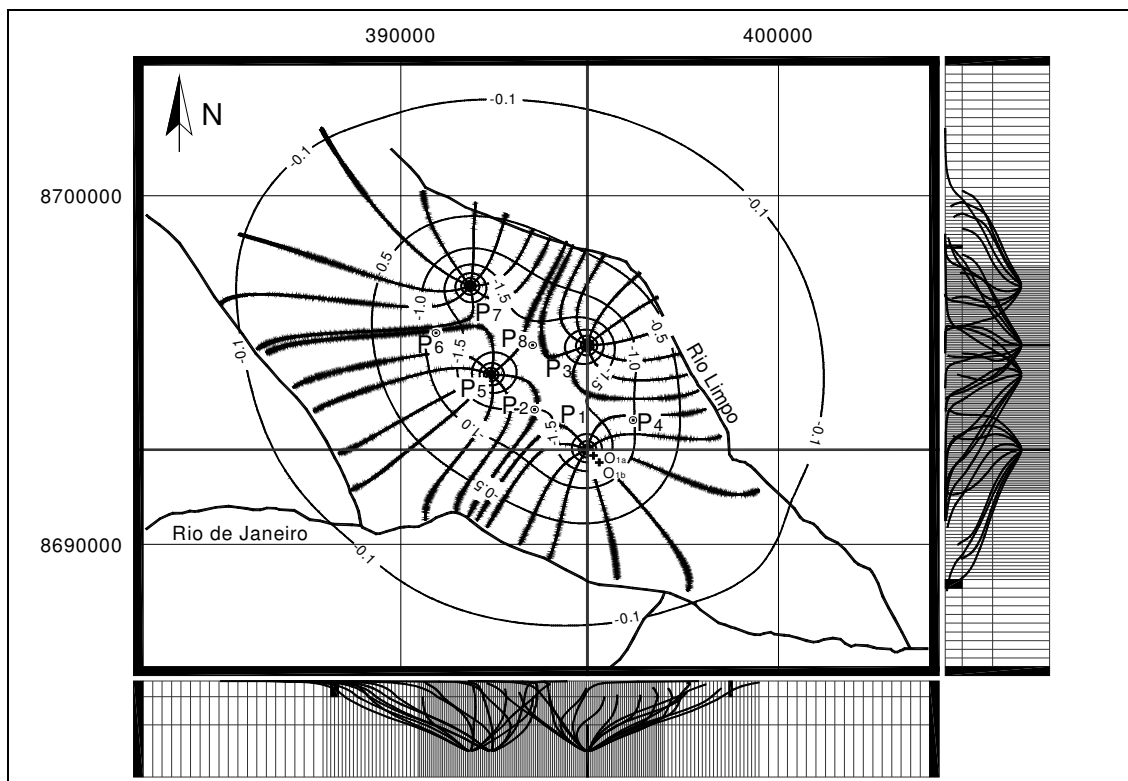


Figura 5 – Rede de fluxo horizontal e seções verticais de fluxos verticais cruzando-se no poço P1 para modelo 01 ($\Delta h = 0$ m; $i = 0$).

A espessura total de 275 metros foi subdividida em 3 camadas horizontais de espessura de 45 metros para a primeira camada (aquífero não-confinado constituída pelo material não-consolidado e não analisada no teste de aquífero, portanto sendo atribuído um valor de padrão de porosidade efetiva de $S_y = 0,2$), 80 m para a segunda camada (aquífero confinado/ não-confinado da Formação Serras de Araras) e 150 m para a terceira camada (aquífero confinado/não-confinado da Formação Posse) como foi apresentado na Figura 3. Para as camadas 2 e 3 foram atribuídas os parâmetros hidrodinâmicos obtidos pela análise numérica do teste de bombeamento e apresentados na Tabela 1.

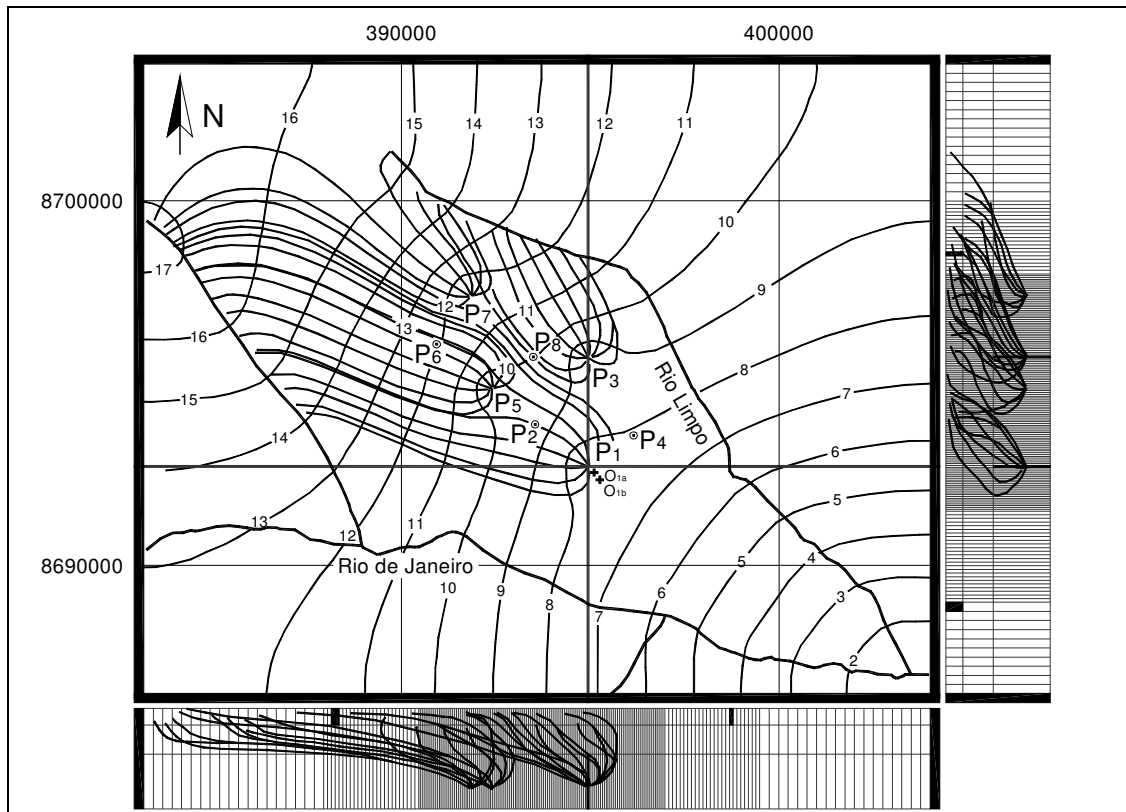


Figura 6 – Rede de fluxo horizontal e seções verticais de fluxos verticais cruzando-se no poço P1 para modelo 05 ($\Delta h = 0,3 \text{ m}$; $i = 5e-4$).

Como condição de contorno foi selecionada uma carga hidráulica especificada em todas as células da borda da área escolhida para possibilitar uma conexão hidráulica com a região circundante que se estende além dos limites da área de simulação. Para os modelos 01 e 02 do nível estático de água considerado plano, uma carga hidráulica de $h = 0 \text{ m}$ foi uniformemente distribuída na área de estudo como valores iniciais. O mesmo valor foi atribuído nas células da borda circundante como carga hidráulica especificada. Para os modelos 03, 04, 05 e 06 foi necessário construir uma superfície potenciométrica plana com os variáveis gradientes hidráulicos em direção noroeste à direção sudeste. Um valor de carga hidráulica específica de $h_{\min} = 0 \text{ m}$ foi atribuído como condição de contorno no vértice inferior direito (no ponto da confluência dos dois rios) e, um valor h_{\max} , foi calculado devido ao respectivo gradiente hidráulico de cada modelo simulado e atribuído como uma segunda condição de contorno no vértice superior esquerdo. Subseqüentemente, a distância reta entre h_{\max} e h_{\min} foi dividida em intervalos equidistantes de $\Delta h = 1 \text{ m}$ em um feixe de retas paralelas de isolinhas potenciométricas perpendiculares à direção do gradiente hidráulico ($h_{\max} - h_{\min}$) cortando, assim, os limites ortogonais da área do modelo. Os pontos de intercepção dessas isolinhas retas traçadas com os limites laterais do modelo, tanto com a borda esquerda quanto com a direita, determinaram os valores da carga hidráulica especificada e, assim, as condições de contorno da área dos modelos 03, 04, 05 e 06. As células restantes da borda, que ainda ficaram sem um valor atribuído, obtiveram um valor pela interpolação linear entres os dois pontos finais de cada segmento de intercepção.

A condutância unitária do rio (C^*) calculou-se pela expressão $C^* = K'W/M \text{ [L/T]}$, comumente definida no MODFLOW, sendo (W) a largura do rio e (M) a espessura da respectiva camada do leito, formada por material de baixa permeabilidade (K'). As larguras e as profundidades dos rios foram variáveis e dependiam do local dos seus percursos aumentando gradualmente em direção à jusante (para o Rio de Janeiro foram atribuídas larguras entre 20 até 50 m, para o Rio Limpo 10 até 20 m), enquanto a espessura da camada do leito de rio permaneceu constante ($M = 1 \text{ m}$) em todos os trechos dos dois rios. Um valor relativamente alto ($K' = 1 \text{ m/d}$) e uniforme foi escolhido para a condutividade hidráulica do material do leito dos dois rios. Um desnível na carga hidráulica de $\Delta h = 0,3 \text{ m}$ entre os rios e a margem do aquífero foi incorporado. Desse modo, os autores Chen e Yin (2001, 2004) simularam um rio efluente e propuseram ao

mesmo tempo uma metodologia para a suavização desse desnível entre a carga hidráulica inicial do rio e a da margem do aquífero antes da execução da modelagem transiente dos modelos 02, 03, 04, 05 e 06, a qual foi utilizada neste estudo.

O pacote WATER BUDGET CALCULATOR do PMWIN, que calcula o balanço hídrico, foi utilizado para determinar as diversas taxas volumétricas de depleção para cada intervalo de tempo na simulação transiente. Inicialmente, para a primeira simulação transiente, com poço desligado por 365 dias, e, em seguida, para a segunda simulação transiente com a bomba ligada por 180 dias e depois desligada por 185 dias. A taxa volumétrica relativa da redução do fluxo de base, D_b , é calculada por:

$$D_b(t)=[q_{b0}(t)-q_b(t)]/Q_w \quad (1)$$

onde q_{b0} [L^3/T] é o fluxo de base quando o poço não está bombeando, q_b [L^3/T] é o fluxo de base quando o poço está bombeando e, Q_w [L^3/T] é a taxa de bombeamento do respectivo poço. A taxa volumétrica relativa da infiltração induzida do rio, D_i , é calculada de forma similar por:

$$D_i(t)=[q_i(t)-q_{i0}(t)]/Q_w \quad (2)$$

onde q_{i0} é a infiltração induzida do rio sem bombeamento, e q_i é a infiltração induzida do rio quando o poço é bombeado. A taxa volumétrica relativa de depleção total, D_t , é a soma dos dois termos D_i e D_b , ou seja:

$$D_t(t)=D_b(t)+D_i(t) \quad (3)$$

Todos os três termos de depleção (D_b , D_i , D_t) são valores relativos e, por isso, adimensionais e dependem do tempo. Curvas de D_b , D_i e D_t versus t podem ser plotadas para apresentar as taxas volumétricas relativas de depleção para cada modelo em simulação transiente. Quando a retirada através de um poço começa, água é removida do armazenamento. A taxa volumétrica relativa da depleção de armazenamento é

$$D_s(t)=[q_s(t)-q_{s0}(t)]/Q_w \quad (4)$$

onde q_{s0} é a redução do armazenamento sem bombeamento e, q_s é a redução do armazenamento quando o poço está bombeando. Um bom teste para conferir a consistência dos resultados de uma simulação é verificando se as seguintes condições são satisfeitas para cada passo de tempo da simulação: (1) Para o período de bombeamento a soma das depleções total e de armazenamento é:

$$D_t+D_s=1 \text{ ou } 100 \% \quad (5)$$

para cada intervalo de tempo. (2) Para o período de pós-bombeamento a soma das depleções total e de armazenamento é:

$$D_t+D_s=0 \quad (6)$$

para cada intervalo de tempo. Em cada simulação foram utilizados os quatro poços P1, P3, P5 e P7 dos oito poços existentes. Este conjunto de quatro poços (P1, P3, P5 e P7) em cada modelo foi bombeado simultaneamente para 180 dias com uma taxa de $Q_w = 500 \text{ m}^3/\text{hora}/\text{poço}$. Após 180 dias, as bombas foram desligadas pelo resto do ano (185 dias) e, com o aplicativo WATER BUDGET do PMWIN, foram determinadas as taxas volumétricas absolutas e relativas dos seguintes tipos de depleção: (1) a redução do fluxo de base (Eq. 1); (2) a infiltração induzida dos rios (Eq. 2); (3) a depleção total (Eq. 3); e (4) a depleção do armazenamento (Eq. 4) em função dos 180 dias de bombeamento e 185 dias de não-bombeamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicou-se o programa PROCESSING MODFLOW-PRO (Chiang, 2005) e sua sub-rotina WATER BUDGET (Cruz, 2006); para realizar seis (6) diferentes situações associadas ao processo de depleção no sistema aquífero-rio-poço real na área da Fazenda Campo Aberto no oeste do Estado da Bahia, que é circundada por dois rios e onde estão instalados atualmente oito (8) poços de bombeamento para fins de irrigação na época não-chuvosa. Os resultados principais das simulações numéricas dos seis diferentes

modelos são apresentados nas Figuras 7 e 8 mostrando a taxa volumétrica relativa da infiltração induzida pelos rios e a taxa volumétrica relativa da redução do fluxo de base do aquífero aos rios. As duas quantias de depleção resultam na depleção total que o aquífero sofre num período de bombeamento suficientemente longo sob condições naturais como um gradiente hidráulico não-nulo ($i > 0$) e a existência de rios efluentes com um desnível na carga hidráulica ($\Delta h > 0$ m) entre o rio e a margem do aquífero. Para um sistema rio-aquífero em equilíbrio (caso modelo 01), onde não há diferença na carga hidráulica ($\Delta h = 0$ m), a redução do fluxo de base é igual a zero, e a depleção total compõe-se apenas da infiltração induzida do rio.

No início do bombeamento, a retirada é balanceada pela redução do armazenamento de água subterrânea e, a medida que o cone de depressão expande-se em decorrer de tempo, a taxa de depleção do armazenamento decrescerá e as taxas de infiltração induzida e de fluxo de base irão aumentar até a taxa de retirada está sendo balanceada e o cone de depressão cessará de expandir-se.

Observa-se na Figura 7, que a taxa volumétrica de infiltração induzida pelos rios para o modelo 01 ($\Delta h = 0$ m; $i = 0$) é de 29% após 180 dias de bombeamento (o valor da depleção total) e o seu valor da redução de fluxo de base é igual a zero na Figura 8. Com crescimento do gradiente hidráulico natural o valor da infiltração induzida cai até um valor de 17% para o modelo 06 ($i = 1 \text{ e-}3$). Inversamente, a taxa volumétrica de redução do fluxo de base cresce com o aumento do gradiente hidráulico. A depleção total (a soma da depleção de fluxo de base e da depleção de infiltração induzida do rio) alcance nestas 6 simulações sempre o valor máximo de 29 % após 180 dias de bombeamento e, por isso, seu respectivo gráfico não foi apresentado neste trabalho.

Com ênfase na preocupação da situação fluvial na área de estudo, foi simulado com base do modelo 02 um período de bombeamento extremamente longo de até 1 ano (365 dias) em função de vários conjuntos de poços (1 até 8 poços ligados em bombeamento diário de 24 horas com a vazão de $Q_w = 500 \text{ m}^3/\text{h}/\text{poço}$). (2), quatro poços (3) e oito poços (4) ligados. A simulação foi feita com base do modelo 02 ($\Delta h = 0,3$ m; $i = 0$).

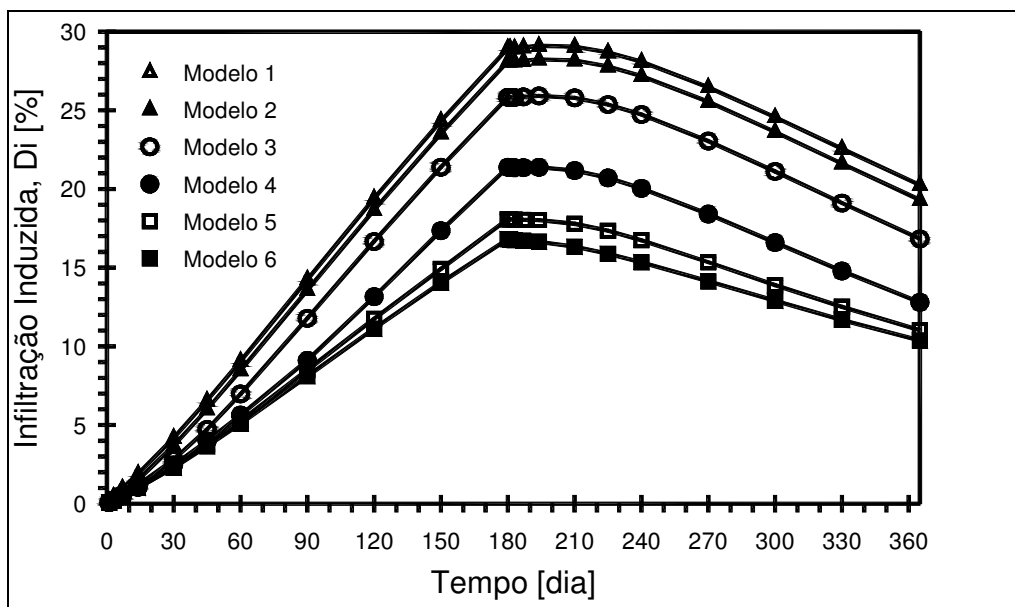


Figura 7 – Apresentação das taxas volumétricas relativas de infiltração induzida dos rios em função do gradiente hidráulico para os 6 modelos simulados.

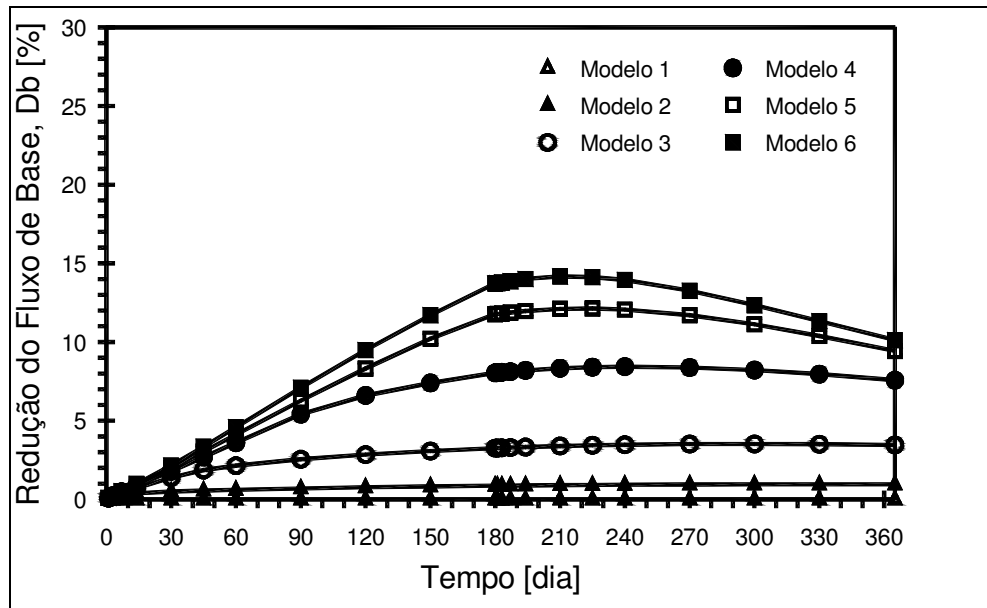
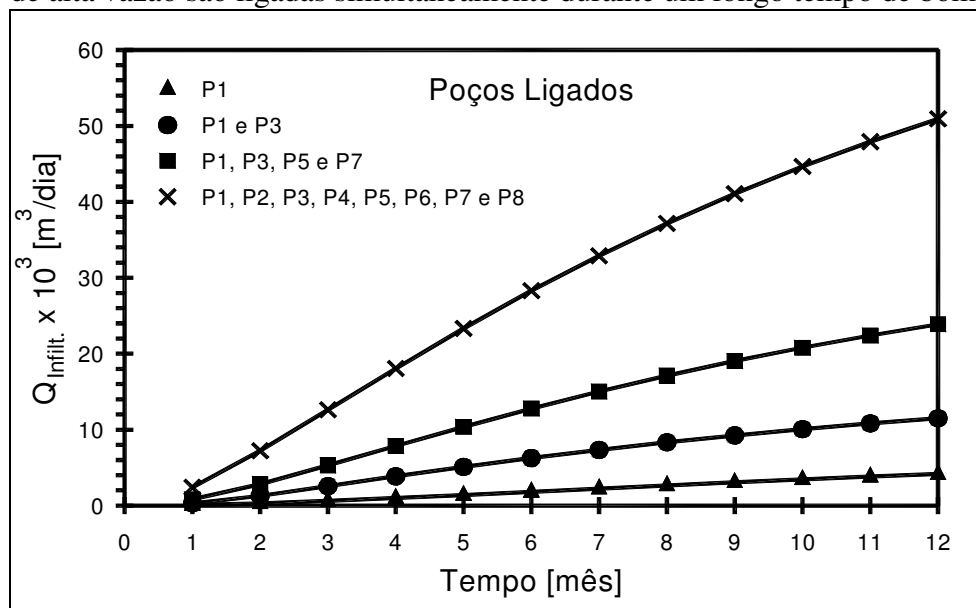


Figura 8 – Apresentação das taxas volumétricas relativas de depleção da redução de fluxo de base em função do gradiente hidráulico para os 6 modelos simulados.

A Figura 9 indica claramente, que as taxas de infiltração do rio não são apenas um somatório das taxas individuais de cada poço ligado, mas desviam da linearidade com número crescente de poços ligados e com longos períodos de bombeamento. Isso poderia ser um indicador de superexploração dos rios quando muitas bombas de alta vazão são ligadas simultaneamente durante um longo tempo de bombeamento.



Figuras 9 – Curvas das taxas volumétricas absolutas de infiltração ($\times 10^3$ [m³/dia]) induzidas pelos dois rios efluentes durante 1 ano de bombeamento para: um poço (1), um conjunto de dois poços (2), quatro poços (3) e oito poços (4) ligados. A simulação foi feita com base do modelo 02 ($\Delta h = 0,3$ m; $i = 0$).

SIMULAÇÃO DO BOMBEAMENTO EXCESSIVO

Conhecer o tempo necessário para alcançar o estado estacionário (ou quase estacionário) durante um bombeamento de longa duração é de grande interesse para as Superintendências de Recursos Hídricos (SRH, Salvador-BA) responsáveis pelas outorgas de cada consumidor de grande quantidade de água para fins agrícolas, como é o caso da Fazenda Campo Aberto, que usa altas taxas de retirada de água (em torno de 500 m³/h/poço) para cada um dos oito poços já instalados, que são conectados aos pivôs de irrigação.

Um teste hipotético como demonstração de bombeamento excessivo de até 10.000 (dez mil) dias foi simulado no poço P1 nesta área de estudo, que mostra uma curva de rebaixamento no piezômetro O1a

como a mesma é conhecida na teoria desenvolvida por Boulton (1973), no qual o cone de depressão começa a se expandir novamente devido as retiradas prolongadas de água subterrânea (Figuras. 10 e 11).

Nota-se que as curvas da linha grossa nos gráficos 10 e 11 mostram claramente o efeito da infiltração dos rios ($K' = 1 \text{ m/d}$) após 1.000 (mil) dias de bombeamento, manifestando-se em forma de dobramento para horizontal do trecho final das curvas indicando, assim, a entrada de um novo estado de equilíbrio causado pela infiltração induzida dos rios.

Ao contrário disso, a simulação sem considerar o efeito da infiltração induzida pelos rios, as curvas da linha fina nos gráficos 11 e 12 mostram uma propagação expansiva do cone de depressão do poço bombeado pela subida rápida do trecho final da curva. Quando todos os 8 poços estão em bombeamento simultâneo, a subida no trecho final das duas curvas de rebaixamento calculadas é mais acentuada, como se pode ver na Figura 11.

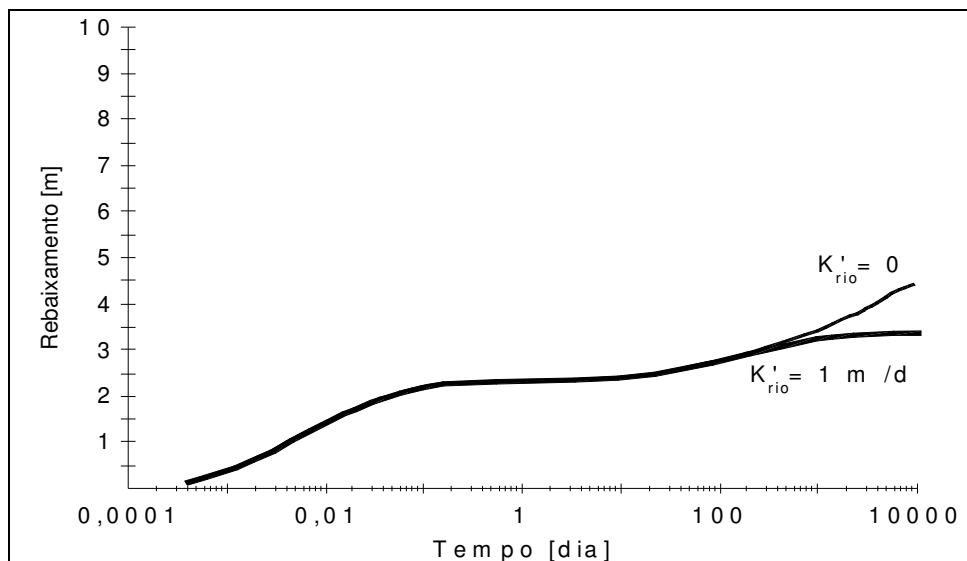


Figura 10 – Rebaixamento simulado no piezômetro O1a até 10.000 dias de bombeamento no poço P1 com efeito (linha grossa) e sem efeito (linha fina) da infiltração induzida dos rios.

Para evidenciar esta conjectura de uma possível superexploração foi projetado e desenvolvido um medidor automático de nível de água com dispositivo de memória (Neuenschwander e Schuster, 2005) e instalado no poço de observação O1a para registrar continuamente em intervalo de duas (2) horas a variação do nível estático de água durante o ano de 2006. A Figura 12 mostra claramente uma curva suave de rebaixamento do nível de água de cerca de dois (2) metros durante o período a partir do mês de 12/2005 até o fim do mês de 04/2006 devido ao bombeamento no poço P1 em conjunto com os demais poços na Fazenda Campo Aberto. Observe-se que a curva contínua do rebaixamento está permanentemente interrompida pelo rebaixamento intermitente causado pelo bombeamento diário executado no poço P1 apenas 80 metros afastado do medidor no poço O1a. Este poço foi ligado várias vezes neste período, o que é indicado pela frequência de picos agudos e bruscos de rebaixamento de cerca de 2,8 m, um valor que já foi constatado no teste de bombeamento realizado no ano de 2003 e apresentado na Figura 4.

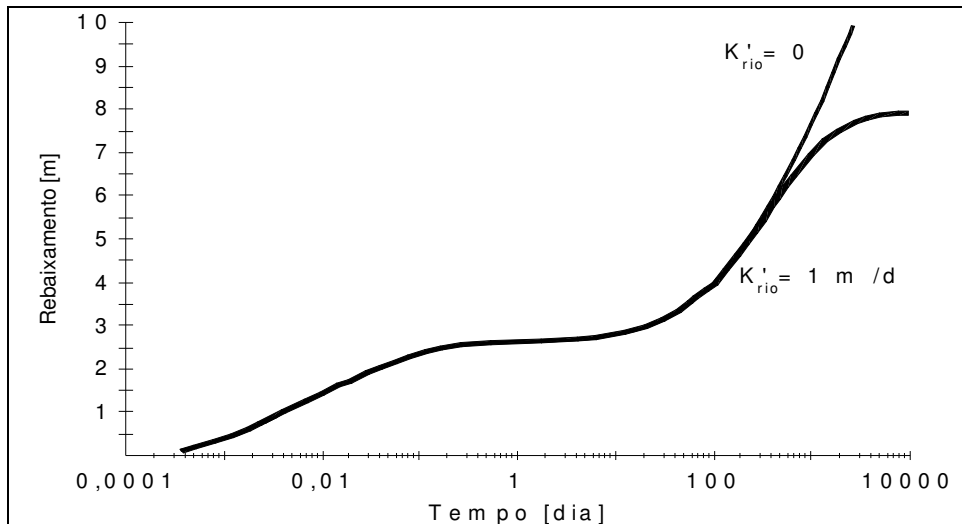


Figura 11 – Rebaixamento simulado no piezômetro O1a até 10.000 dias de bombeamento simultâneo em conjunto de 8 poços com efeito (linha grossa) e sem efeito (linha fina) da infiltração induzida dos rios.

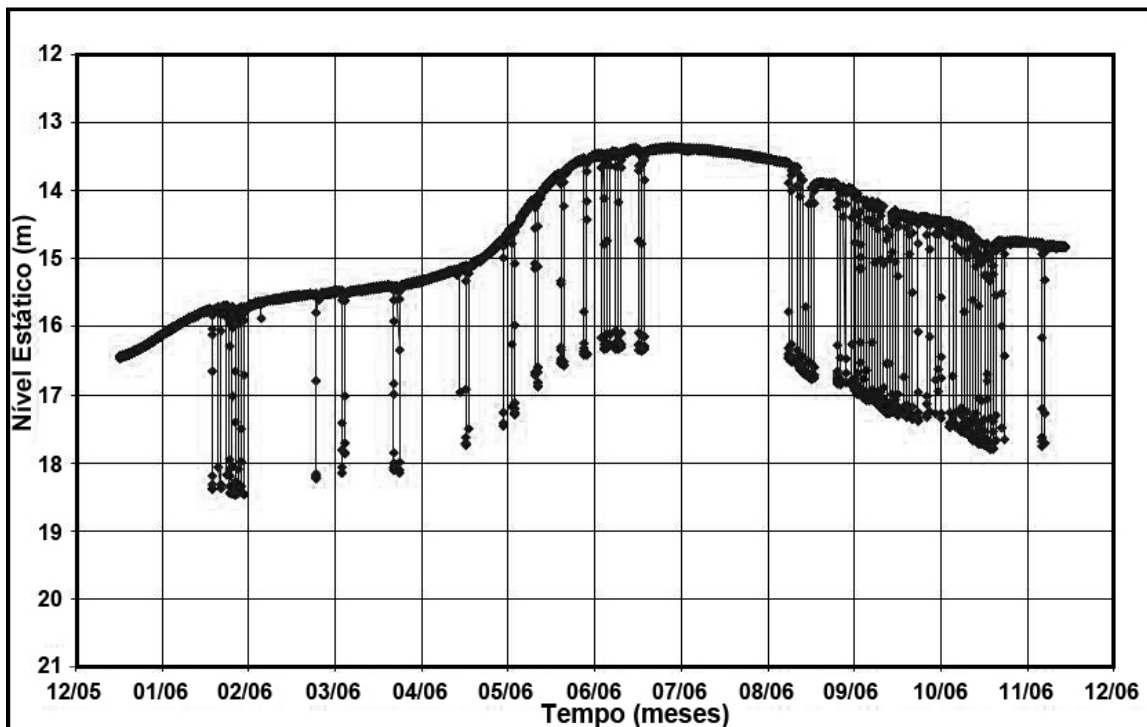


Figura 12 – Variação do nível de água medida no poço de observação O1a durante o ano de 2006 mostrando, ao mesmo tempo, os rebaixamentos pelo bombeamento diário no poço P1.

A recuperação do nível estático de água ocorreu no período dos meses de 04 até 08/2006, quando não houve ou apenas poucos bombeamentos (durante cerca de dois meses no período não-chuvoso) no poço P1 e, provavelmente também, nos demais poços da fazenda. A partir do mês de 08/2006 até o mês de 11/2006 o bombeamento se intensificou no P1 e, o nível de água começou a se rebaixar novamente.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo de simulação e, mediante disso, efetuada uma análise numérica com o objetivo de avaliar os efeitos de depleção num sistema real de rio-aquífero-poço. Foi pretendido determinar as taxas volumétricas de depleção que podem ocorrer quando bombeamentos com altas taxas de retirada e longa duração são executados numa região que é delimitada por rios, como é a

situação na área da Fazenda Campo Aberto situada no aquífero arenito de Chapadão Urucuia no oeste do Estado da Bahia. Esta fazenda pediu outorga de oito poços para fins de irrigação na SRH/BA em Salvador. Um primeiro estudo foi feito no ano de 2003, no qual foi executado um teste de bombeamento e, numa segunda visita em 2005, foi instalado um medidor automático em um poço que registrou a variação contínua do nível estático durante o ano de 2006. Para que se possa fazer qualquer avaliação da área em estudo, foi necessário determinar novamente os parâmetros hidrodinâmicos da Formação Posse com base dos testes de bombeamento executados durante o ano de 2003. Os parâmetros, assim, analisados não variam muito daqueles, que já foram determinados anteriormente em outros locais do Aquífero Urucuia, portanto, estes parâmetros hidrodinâmicos da Formação Posse parecem ser bastante confiáveis e mostram claramente a grande homogeneidade hidrogeológica deste aquífero. No entanto, existem ainda certas incertezas em relação aos parâmetros hidrodinâmicos da formação geológica superior (Formação Serra das Araras). Até hoje, nunca foi efetuado um ensaio de bombeamento exclusivo nesta formação, pois ela é do menor interesse para o suprimento hídrico da região e serve apenas para uso domiciliar.

As simulações com um modelo hidrogeológico 3-D, composto de três camadas, foram feitas com auxílio do programa de fluxo subterrâneo PMWIN-PRO. Neste modelo foram incorporados os dois rios efluentes da região e, o gradiente hidráulico natural ali presente foi variado. Cada simulação encerrou-se com a análise do balanço hídrico através do aplicativo WATER BUDGET, que possibilitou a determinação das diversas taxas volumétricas de depleção de interesse, tais como a infiltração induzida pelos rios, a redução do fluxo de base para os rios e o armazenamento em função da variação do gradiente hidráulico natural do nível potenciométrico da área de estudo.

Estas análises numéricas aqui apresentadas são mais realistas, pois levam tanto o efeito do não-equilíbrio entre rio e aquífero quanto o efeito do gradiente hidráulico natural em consideração e, portanto, resultam em taxas de infiltração induzida bastante menores comparadas com os valores determinados pelos programas analíticos baseados na teoria de Glover e Balmer, que não são projetados para o efeito da redução do fluxo de base, mas são geralmente utilizados pelos órgãos de recursos hídricos no processo de outorga.

Esta redução de fluxo de base é um efeito que não deve ser subestimado, pois a descarga de água subterrânea ao rio pode ser interrompida inteiramente na vizinhança dos poços e, assim, pode causar uma diminuição significativa das suas respectivas vazões. Observaram-se variações de vazão média em alguns rios, desaparecimento de vários nascentes e mudanças na vegetação nos últimos anos na região, como foi constatado e documentado pelos ambientalistas. Ainda não existem resultados conclusivos que o rebaixamento do nível de água no Aquífero Urucuia em consequência do excessivo uso de água subterrânea é responsável para estes efeitos casuais.

Uma simulação de um caso hipotético de bombeamento excessivo e de longa duração em um poço real da área completou este trabalho. A respectiva curva de rebaixamento mostra um comportamento de tipo Boulton em que, após uma fase de equilíbrio de poucos dias, o cone de depressão começa se expandir novamente. Apenas fronteiras permeáveis, como são os rios ou outros mananciais superficiais, podem encerrar a expansão do cone de depressão. Por isso, não se recomenda instalar poços de produção com altas taxas e longos períodos de retirada em uma distância menor que 4.000 (quatro mil) metros afastados de um rio para uma retirada maior do que 500 m³/h. Na realidade, qualquer bombeamento excessivo e de longa duração na época de estiagem afeta os rios da região depois de alguns dias de bombeamento.

A melhor maneira de se informar sobre o comportamento atual e futuro de um aquífero extremamente bombeado seria o monitoramento contínuo por meio de medidores automáticos de nível de água instalados nos poços como foi testado em um ensaio contínuo de um ano neste trabalho, que armazenam os valores medidos, ou, ainda melhor, transmitem os mesmos através de telemetria ao lugar de análise. Estes dados, assim, coletados podem garantir uma vigilância do respectivo aquífero e prevenir impactos inesperados no futuro.

Resumindo pode-se dizer que os resultados deste trabalho possam ajudar na tomada de decisão para a liberação de outorga pelo uso da água subterrânea para fins de irrigação e manter a sustentabilidade ambiental pela adequada gestão dos recursos hídricos disponíveis nas bacias da região no oeste do Estado da Bahia.

Baseados nos estudos realizados no aquífero de Urucuaia nos últimos anos (Schuster, 2002a; Schuster, 2002b; Schuster, 2003), foram elaborados pelo diretor geral do Instituto de Gestão das Águas e Clima (INGÁ - Salvador-Bahia, antigamente a Superintendência de Recursos Hídricos, SRH) os seguintes procedimentos administrativos e critérios técnicos para perfuração de poços tubulares para fins de exploração de água subterrânea no aquífero Urucuaia de domínio do Estado da Bahia (INGÁ - Instrução Normativa N° 15, 2010):

a) Distâncias entre poços tubulares:

- I – Poços com vazão menor que 30 m³/h: 600 m;
- II – Poços com vazão maior ou igual a 30 m³/h e menor que 100 m³/h: 1000 m;
- III – Poços com vazão maior ou igual a 100 m³/h e menor que 200 m³/h: 1500 m
- IV – Poços com vazão maior ou igual a 200 m³/h e menor que 300 m³/h: 2000 m;
- VI – Poços com vazão maior ou igual a 300 m³/h e menor ou igual a 500 m³/h: 2500 m.

b) Distâncias entre poços tubulares e corpos hídricos superficiais:

- I - Poços com vazão menor que 20 m³/h: 500 m;
- II - Poços com vazão maior que 20 m³/h: 2.500 m.

c) Para cada poço de bombeamento devem ser obedecidos os seguintes limites:

- I – Vazão máxima de bombeamento de 500 m³/h;
- II – Período máximo de bombeio de 18 h/dia.

A capacidade de exploração das águas subterrâneas no aquífero Urucuaia fica limitada a uma vazão máxima instantânea de 360.000 m³/h. Esta instrução normativa N° 15 entra em vigor na data de sua publicação (18 de março de 2010).

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e CTHIDRO, pela bolsa de mestrado concedida ao segundo autor. A SRH-BA e GAMA ENGENHARIA LTDA pelo apoio técnico e financeiro da pesquisa, e aos revisores anônimos pelas correções e sugestões apresentadas. Em especial, agradecemos ao Sr. Ricardo Teixeira pela sua hospitalidade e apoio na realização dos estudos hidrogeológicos na Fazenda Campo Aberto.

REFERÊNCIAS

- Boulton, N. S. (1973). The influence of delayed drainage on data from pumping tests in unconfined aquifers. *Journal of Hydrology*, 19 (2), 157-169.
- Butlar Jr. J. J.; Zlotnik, V. A.; Tsou, M.-S. (2001). Drawdown and stream depletion produced by pumping in the vicinity of a partially penetrating stream. *Ground Water*, 39(5), 651-659.
- Chen, X.; Yin, Y. (2001). Streamflow depletion: modeling of reduced baseflow and induced stream infiltration from seasonally pumped wells. *Journal of American Water Resources Association*, 34 (3), 603-616.
- Chen, X.; Yin, Y. (2004). Semianalytical solutions for stream depletion in partially penetrating streams. *Ground Water*, 42(1), 92-96.
- Chiang, W-H. (2005). 3D-Groundwater Modeling with PMWIN – a simulation system for modeling groundwater flow and pollution. 2. ed., Springer-Verlag, Berlin -Heidelberg -New York, 397p.
- Cruz, J. L. F. (2006) *Modelagem de fluxo subterrâneo com vistas à depleção do rio como efeito do bombeamento extremo em uma área de estudo situada no oeste Baiano*. Campina Grande-PB, 122p, Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Campina Grande.

- Glover, R. E.; Balmer C. G.. (1954). River depletion from pumping a well near a river. *Trans. American Geophysical Union*, 35(3), 468-470.
- Hantush, M. S. (1965). Wells near streams with semipervious beds. *Journal of Geophysical Research*, 70(12), 2829-2838.
- Hunt, B. (1999). Unsteady stream depletion from ground water pumping. *Ground Water*, 37(1), 98-102.
- Hunt, B.; Weir J.; Claussen, B. (2001). A stream depletion field experiment. *Ground Water*, 39(2), 283-289.
- INGÁ (2010). Instrução Normativa Nº. 15. *Dispõe sobre procedimentos administrativos e critérios técnicos para perfuração de poços tubulares para fins de exploração de água subterrânea no aquífero Urucuia de domínio do Estado da Bahia*. O Diretor Geral do Instituto de Gestão das Águas e Clima (INGÁ) de 18 de Março de 2010, Salvador – Bahia.
- McDonald, M.G.; Harbaugh, A.W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *USGS Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6, Chapter A1, 576p.
- Neuenschwander, R.; Schuster, H.D.M. (2005). Projeto e construção de um medidor automático de nível de água. *Manual de Operação*, 5p.
- Schuster, H. D. M. (2002a). Modelagem de fluxo subterrâneo com vistas à definição de parâmetros para outorga de mananciais subterrâneos na bacia hidrográfica do Rio do Cachorro oeste do Estado da Bahia. *Relatório Final*, Contrato nº 0022/2001 - SRH/PGRH/BIRD, Salvador - BA, 125p.
- Schuster, H. D. M. (2002b). Modelagem matemática do uso conjunto das águas superficiais e subterrâneas da Sub-Bacia do Rio das Fêmeas – Bahia (Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco. *Relatório Final*, ANA / GEF / PNUMA/OEA), Salvador-BA, 53p.
- Schuster, H. D. M. (2003). Modelagem de fluxo subterrâneo com vistas à definição do distanciamento entre poços e mananciais no oeste baiano. *Relatório Final*, Contrato nº 034/2003-SRH/PGRH/BIRD, Salvador-BA, 42p.
- Sophocleous, M.; Koussis, A.; Martin, J. L.; Perkins, S. P. (1995). Evaluation of simplified stream-aquifer depletion models for water rights administration. *Ground Water*, 33(4), 579-588.
- Theis, C. V. (1941). The effect of a well on the flow of a nearby stream. *Trans. American Geophysical Union*, 22(3), 734-738.