



SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO FLUXO DE ÁGUAS DO SISTEMA  
AQUÍFERO URUCUIA NA BACIA HIDROGEOLÓGICA DO RIO  
CORRENTE (BA)

NUMERICAL SIMULATION OF GROUNDWATER FLOW OF URUCUIA  
AQUIFER SYSTEM IN CORRENTE RIVER HYDROGEOLOGICAL  
WATERSHED (BA)

Bruno Zanon Engelbrecht<sup>1</sup>; Hung Kiang Chang<sup>2</sup>

Artigo recebido em: 29/05/2015 e aceito para publicação em: 20/10/2015.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v29i2.28435>

**Resumo:** Com o objetivo de quantificar o balanço hidrológico e compreender a dinâmica do fluxo das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Urucuia (SAU), na bacia hidrogeológica do rio Corrente, realizou-se uma simulação do fluxo dessas águas, em regime permanente. O SAU aloja-se na bacia hidrográfica do São Francisco e é composto pelo conjunto de aquíferos interligados, cujo arcabouço é formado pelas rochas do Grupo Urucuia. O sistema é do tipo poroso granular, com geometria de um espesso tabuleiro, constituído essencialmente por arenitos. O método de elementos finitos foi utilizado na simulação numérica, empregando-se o algoritmo computacional FEFLOW (*Finite Element Subsurface Flow e Transport Simulation System*). Por meio da simulação numérica foram estimados os parâmetros hidrodinâmicos: recarga máxima de 267 mm/a e mínima de 142 mm/a; condutividade hidráulica horizontal e vertical de  $9,7 \times 10^{-5}$  m/s; fluxo de base de  $1,26 \times 10^7$  m<sup>3</sup>/dia. Os resultados ressaltam a importância da bacia do rio Corrente na manutenção da vazão do rio São Francisco e confirmam a natureza homogênea e isotrópica do SAU.

**Palavras-chave:** Grupo Urucuia. Rio São Francisco. Modelagem hidrogeológica. Simulação numérica por elementos finitos. FEFLOW.

**Abstract:** Steady state groundwater flow simulation of Urucuia Aquifer System (UAS) in the Corrente river watershed was carried out in order to quantify the water balance and to understand the dynamics of the groundwater flow. The UAS is located in the San Francisco river watershed and corresponds to a set of interconnected aquifers that occur in the Urucuia group. The aquifer is composed of sandstones with a table mountain architecture. In order to perform the numerical simulation, finite element method was applied using FEFLOW (*Finite Element Subsurface Flow e Transport Simulation System*) computational algorithm. The following hydrodynamic parameters were obtained from numerical simulation: horizontal and vertical hydraulic conductivity of  $9.7 \times 10^{-5}$  m/s; maximum and minimum recharges of 267 mm/y and 142 mm/y, respectively; and baseflow of  $1.26 \times 10^7$  m<sup>3</sup>/day. The results of the steady state model confirmed the homogeneous and isotropic nature of the aquifer as well as its importance in maintaining the flow of São Francisco River.

**Keywords:** Urucuia Group. São Francisco River. Groundwater modelling. Finite element numeric simulation. FEFLOW.

## 1 INTRODUÇÃO

A modelagem matemática hidrogeológica constitui importante ferramenta em estudos hidrogeológicos, visto que pode representar os processos atuantes no aquífero por meio de formulações numéricas, permitindo compreender e representar a dinâmica de fluxo das águas subterrâneas (FETTER, 2001).

A bacia do Rio Corrente, localizada na porção média da Bacia Hidrográfica do

Rio São Francisco, corresponde a uma das 34 unidades de gestão de recursos hídricos estabelecidas pela Agência Nacional de Águas (ANA) para o estado da Bahia. Sua área de 47.265 km<sup>2</sup> representa cerca de 7% de toda Bacia do Rio São Francisco (ANA, 2004); desse montante, cerca de 22.600 km<sup>2</sup> (aproximadamente 48%) são ocupados pelo Sistema Aquífero Urucuia (SAU). A importância do SAU para a manutenção da vazão permanente (Q95) do rio São Francisco é destacada no plano decenal de recursos hídricos da Bahia (ANA, 2004): “O sistema aquí-

<sup>1</sup> Universidade Estadual Julio de Mesquita Filho - Rio Claro. ([bruno\\_zenon2@hotmail.com](mailto:bruno_zenon2@hotmail.com))

<sup>2</sup> Universidade Estadual Julio de Mesquita Filho - Rio Claro. ([chang@rc.unesp.br](mailto:chang@rc.unesp.br))

fero Urucuia-Areado é o mais importante no domínio poroso em função da sua ampla ocorrência (104.358 km<sup>2</sup>) e por apresentar a maior reserva hídrica de toda a bacia (135,3 m<sup>3</sup>/s). [...] É interessante destacar a importância do aquífero Urucuia-Areado na manutenção do escoamento de base de rios da margem esquerda do São Francisco como Carinhanha, Corrente e Grande”.

O crescimento agrícola do oeste baiano demanda intensa utilização dos recursos hídricos, além de provocar grandes alterações no uso e ocupação do solo, promovendo a supressão da cobertura vegetal e a implantação de extensas áreas de lavouras e, com isso, alterando as propriedades e características da infiltração de água para o aquífero. Spagnolo et al. (2012), usando técnicas de sensoriamento remoto, determinaram que no município de São Desidério, localizado na sub-bacia do Rio Grande, a área ocupada com agricultura teve aumento considerável, de 4% para 32,5%, enquanto a vegetação nativa teve acentuado decréscimo, de 93,4% para 57,2%, no período de 1984 a 2008.

Assim, a elaboração de um plano de gestão das águas subterrâneas é fundamental para que a exploração do aquífero seja realizada de maneira sustentável, sem o comprometimento do escoamento de base para o rio São Francisco. Por sua vez, a compreensão da dinâmica do fluxo das águas subterrâneas é de fundamental importância para o planejamento da gestão dos recursos hídricos, visto que permite avaliar os efeitos das alterações climáticas, da exploração do aquífero e das alterações no uso e ocupação do solo (e.g. BARLOW, 2005; SEPÚLVEDA et al., 2012).

Neste contexto, este trabalho vem contribuir com um modelo hidrogeológico conceitual do SAU, na sub-bacia do Rio Cor-

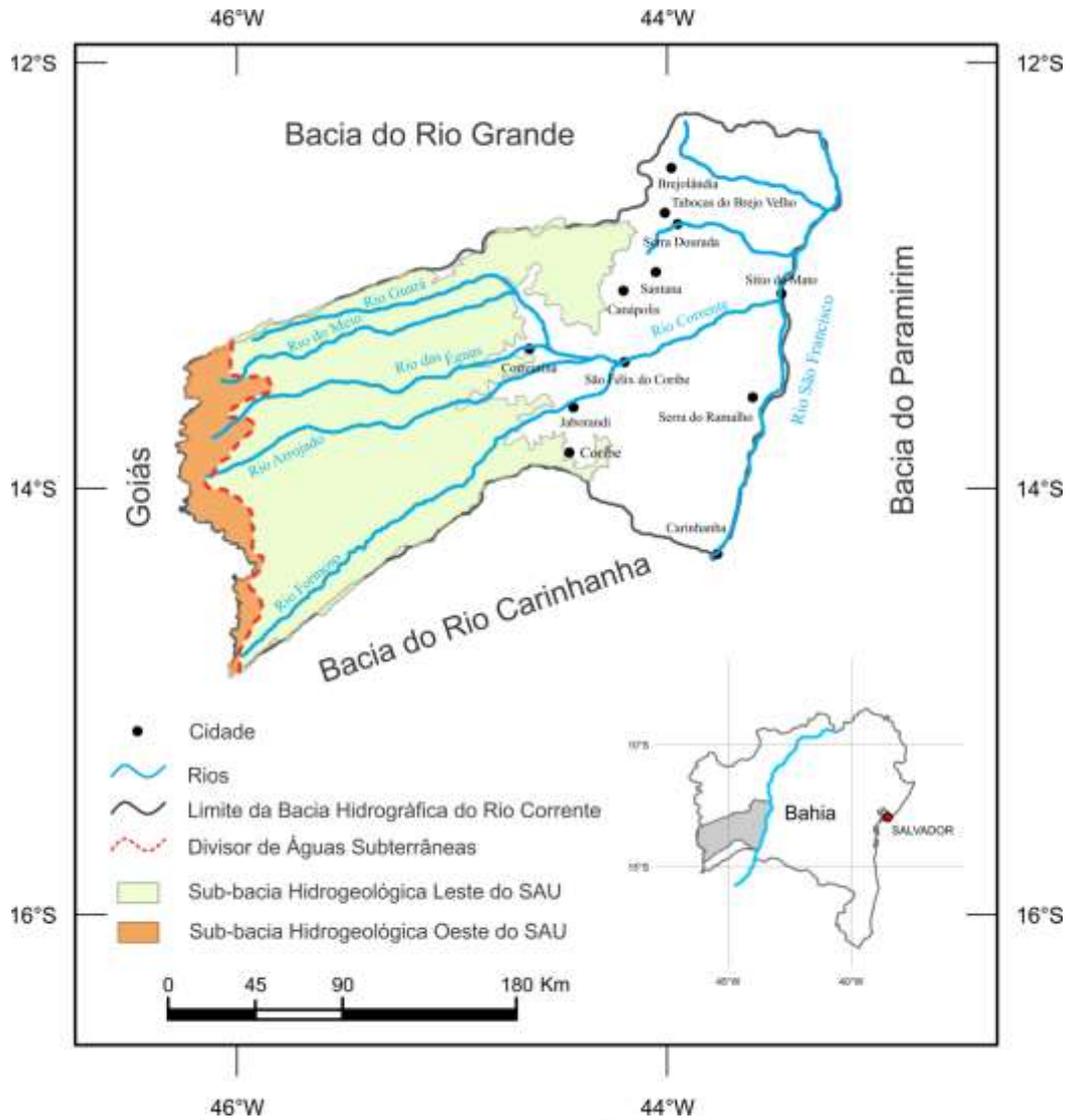
rente (BA), para compreensão da dinâmica do fluxo das águas subterrâneas e sua interconexão com as águas superficiais; o modelo conceitual é validado por um modelo matemático e simulação numérica em regime permanente.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

A área estudada corresponde à sub-bacia hidrogeológica leste do SAU, localizada na bacia hidrográfica do Rio Corrente, oeste do estado da Bahia, entre as latitudes 12°45' e 15°00' Sul e longitudes 46°15' e 44°15' Oeste. Faz parte da bacia hidrográfica do rio São Francisco e abrange principalmente os municípios de Correntina e Jaborandi. Estende-se por aproximadamente 22.500 km<sup>2</sup>; limitada a oeste pela Serra Geral de Goiás, a leste pelas rochas do embasamento cristalino (Bacia do Paramirim), a norte pela sub-bacia do Rio Grande e a sul pela sub-bacia do Rio Carinhanha (Figura 1).

## 3 METODOLOGIA E DADOS UTILIZADOS

O desenvolvimento deste trabalho envolveu a contextualização geológica e hidrogeológica do SAU através do levantamento bibliográfico; a caracterização geológica de superfície e a identificação e definição do arcabouço estrutural e estratigráfico da área de estudo, a partir de trabalhos de campo; a formulação de um modelo conceitual, a partir da integralização dos dados levantados; e a simulação do fluxo de águas subterrâneas pelo método de elementos finitos (MEF), em regime permanente (Figura 2), utilizando o *software* FEFLOW - *Finite Element Subsurface Flow e Transport Simulation System*<sup>®</sup> 6.1 (DIERSCH, 2014).



**Figura 1** - Localização da bacia hidrográfica do Rio Corrente e delimitação das bacias hidrogeológicas leste e oeste do SAU

**Figure 1** - Location map of the Corrente River watershed and the limits of the eastern and western watersheds of Urucuia Aquifer System (UAS)

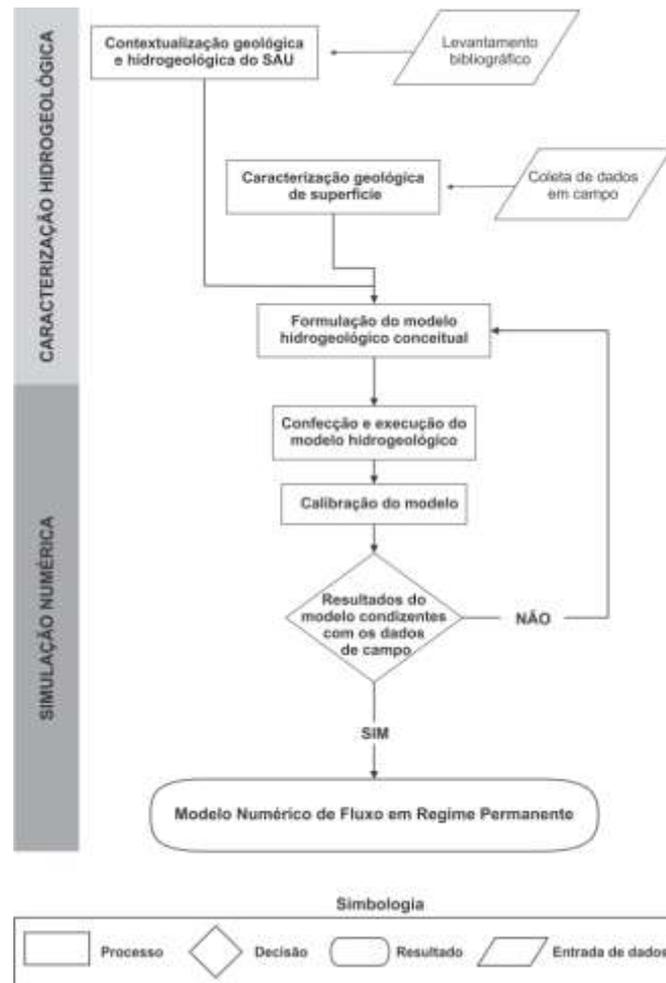


Figura 2 – Fluxograma de atividades desenvolvidas  
Figure 2 - Diagram showing workflow

#### 4 CONTEXTO GEOLÓGICO

O SAU é constituído por um conjunto de aquíferos interconectados, cujo arcabouço é composto pelas rochas do Grupo Urucuia, que se insere no contexto geotectônico da Bacia Sanfranciscana. O sistema aquífero é do tipo intergranular, com geometria de um tabuleiro espesso constituído essencialmente por arenitos (GASPAR, 2006).

O Grupo Urucuia é composto pelas formações Posse e Serra das Araras, e assenta-se em discordância sobre as rochas do Grupo Bambuí – representado por sequências pelito-carbonáticas do Proterozoico Superior – e, localmente, sobre terrenos granito-gnáissicos do complexo Gnáissico-Migmatítico de Correntina, Almas-Cavalcante e do embasamento Arqueano. A análise faciológica realizada por Spigolon e Alvarenga (2002) permitiu reconhecer uma

superfície erosiva delimitando as formações Posse e Serra das Araras, dado corroborado pela análise de Bueno (2012) que descreve o paleossolo desenvolvido durante a formação dessa superfície.

O Grupo Urucuia (Neocretáceo) é composto por arenitos com intercalações pelíticas (lentes e/ou camadas centimétricas); seus depósitos são resultado da interação de sistemas eólico e fluvial. CPRM e UFBA (2007a) e Chang e Silva (2015) indicam espessura máxima na ordem de 300 metros para essa unidade geológica.

Segundo Campos e Dardenne (1997), a Formação Posse é a principal unidade do Grupo Urucuia e apresenta duas fácies distintas. A fácies 1 é constituída por arenitos muito finos a médios, bem selecionados, com boa maturidade textural e mineralógica, e presença de lentes conglomeráticas esparsas, contendo seixos do embasamento e do pró-

prio arenito. Esses arenitos, depositados em sistema eólico, apresentam estratificações cruzadas tangenciais de grande porte e alto ângulo e, por vezes, matriz pelítica. A fácies 2 é constituída por arenitos finos, com matriz argilosa ou não, bem selecionados, depositados em um sistema fluvial entrelaçado. Apresentam estratificações cruzadas de pequeno porte e, raramente, estratos planoparalelos. Segundo os mesmos autores, a Formação Serra das Araras é constituída essencialmente por arenitos silicificados, com finas intercalações de siltito e argilito; a presença de níveis conglomeráticos é comum. Apresentam estruturas planoparalelas e estratificações cruzadas acanaladas de pequeno porte. Campos e Dardenne (1997) interpretam o sistema deposicional para a Formação Serra das Araras como fluvial.

## 5 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

Os estudos realizados por Amorim Jr. (2003) e Arraes (2008) posicionam o divisor de águas subterrâneas, de direção aproximada Norte-Sul, na porção oeste do SAU (Figura

1), próximo à Serra Geral de Goiás. A sub-bacia hidrogeológica leste do SAU contribui com o escoamento de base para a bacia hidrográfica do rio São Francisco, enquanto a sub-bacia oeste contribui para a bacia hidrográfica do rio Tocantins.

Pimentel et al. (2000), utilizando-se da decomposição dos hidrogramas no período de 1984 a 1995, estimaram recarga de 257 mm/ano na bacia do Rio Grande (20% da precipitação média anual); também concluíram que o fluxo de base do SAU é responsável por 90% da vazão dos rios que cortam o aquífero. De maneira análoga, Campos et al. (2006) analisaram os dados relativos aos anos de 1999 e 2000 da estação fluviométrica de Gatos, na bacia do rio Corrente, e estimaram uma infiltração de 177 mm/ano (16% da precipitação média anual). CPRM e UFBA (2007b) analisaram de maneira sistemática os hidrogramas das estações fluviométricas Gatos e Arrojado, aplicando os métodos de Thorntwaite, Meyboom, Hysep e Maillet, e estimaram taxas de recargas entre 11% e 19% da precipitação total anual média (Tabela 1).

**Tabela 1** - Taxas de recarga do SAU, estimadas por diversos autores e métodos  
**Table 1** - Recharge rates of UAS estimated by different authors and methods

Referência	Método	Sub-bacia hidrográfica	Recarga	
			% da precipitação total anual média	Lâmina média anual (mm)
CPRM e UFBA (2007b)	Maillet	Corrente	11	149
	Misto: Thorntwaite e HYSEP	Corrente	14	189
	Meyboom	Corrente	16	217
	Thorntwaite médio mensal	Corrente	19	264
Campos et al. (2006)	Meyboom	Corrente	16	177
Gaspar (2006)	Separação gráfica	Corrente	23	279
Pimentel et al. (2000)	HYSEP - mínimo local	Grande	20	257

Gaspar (2006), utilizando dados de estações fluviométricas e pluviométricas, calculou o balanço hidrológico para as bacias hidrográficas dos rios Formoso, Arrojado, Correntina e Guará; obtendo uma recarga total para a região de  $1,72 \times 10^7$  m<sup>3</sup>/d, equivalente a 22,5% da precipitação anual calculada. O fluxo de base médio para essa região foi estimado em  $1,47 \times 10^7$  m<sup>3</sup>/d, a partir da separação gráfica dos histogramas de cada sub-bacia, o que equivale a 20% da precipitação anual.

Os parâmetros hidrodinâmicos (Tabela 2), estimados a partir de testes de bombe-

Os parâmetros hidrodinâmicos (Tabela 2), estimados a partir de testes de bombe-

amento em diversas porções do SAU, revelam relativa homogeneidade do sistema aquífero, apresentando baixa variação dos valores de condutividade hidráulica – em até uma ordem de grandeza. Os valores que apresentam maiores discrepâncias são aqueles obtidos por Gaspar (2006), interpretados pelo método de Neuman (poços 1953, 1907, 950 e 1976; Tabela 2); segundo a própria autora, esses valores podem estar subestimados, uma vez que os poços não são totalmente pene-

trantes e atravessam somente fácies de arenitos finos.

A análise dos testes de bombeamento realizados na Formação Serra das Araras (Fazenda Buriti; Tabela 2) e na Formação Posse (Fazenda Coba; Tabela 2), permitiu que CPRM e UFBA (2007b) concluíssem que o SAU apresenta comportamento isotrópico em ambas as unidades geológicas, uma vez que a condutividade hidráulica vertical assemelha-se à horizontal.

**Tabela 2** - Parâmetros hidrodinâmicos obtidos a partir de testes de bombeamento  
**Table 2** - Hydrodynamic parameters obtained from pumping tests

Referência	Localização/Poço	K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /s)	S	Método
CPRM e UFBA (2007b)	Faz. Coba	1,7E-04	4,1E-02	8,6E-03	Neuman
	Faz. Buriti	6,9E-05	1,6E-02	4,7E-03	Neuman
Schuster et al. (2002)	Edifício Poletto P4B-P3O	1,1E-04	1,6E-02	2,6E-04	Cooper-Jacob
Schuster (2003)	-	-	1,6E-02	2,7E-04	-
	-	-	2,0E-02	5,4E-04	-
Gaspar (2006)	Faz. Espírito Santo	6,5E-05	2,6E-02	-	Cooper-Jacob
	Faz. Marechal Rondon	6,5E-05	2,6E-02	-	Cooper-Jacob
	Faz. Hirata	2,6E-05	8,9E-03	-	Cooper-Jacob
	LEM/Poço sede 2	3,9E-05	2,0E-02	-	Cooper-Jacob
	Poço 1953	2,5E-07	4,9E-05	-	Neuman
Nascimento (2003)	Poço 1907	1,4E-06	2,8E-04	-	Neuman
	Poço 950	4,0E-07	8,0E-05	-	Neuman
	Poço 1976	7,9E-07	1,6E-04	-	Neuman
	Faz. Campinas P250 O	6,8E-05	1,5E-02	7,5E-05	Neuman
	Faz. Campinas P90 O	6,9E-05	1,7E-02	3,0E-04	Neuman
Luz et al. (2009)	Faz. Santo Antônio	4,4E-04	1,7E-02	5,9E-04	Neuman
	Faz. Bombarda/Poço 1	-	1,7E-02	4,5E-03	Neuman
	Faz. Bombarda/Poço 2	-	2,2E-02	7,6E-03	Neuman

## 6 MODELO CONCEITUAL

O modelo conceitual para a sub-bacia hidrogeológica leste do SAU, na bacia do rio Corrente, congrega as especificações/características elencadas abaixo.

- (1) Aquífero regional, do tipo livre, em meio poroso.
- (2) Isotropia e homogeneidade hidráulica do domínio modelado. Fato corroborado pela predomi-

nância e relativa homogeneidade dos arenitos que formam o Grupo Urucuia. As heterogeneidades litológicas, descritas na Formação Serra das Araras, são descontínuas e de pequena espessura, não sendo representativas para a escala do trabalho.

- (3) Drenagens correspondem às zonas de descarga, uma vez que o alto grau de dissecação das dre-

- nagens proporciona a convergência do fluxo subterrâneo para essas áreas.
- (4) Regiões aplainadas da bacia constituem as principais áreas de recarga.
  - (5) Condição de não fluxo com as unidades subjacentes ao Grupo Urucuia, proporcionada pela grande diferença nos valores de condutividade hidráulica (maior que duas ordens de grandeza).
  - (6) Condição de não fluxo nos limites laterais do aquífero. A feição morfológica de platô isolado do Grupo Urucuia impõe a não conectividade lateral com outras unidades geológicas.
  - (7) Os limites norte e sul da bacia hidrográfica constituem divisores de águas subterrâneas entre as bacias hidrogeológicas dos rios Carinhanha e Grande, enquanto o limite oeste é dado pelo divisor hidrogeológico entre as bacias leste e oeste do SAU. Dessa forma, assume-se ausência de fluxo nos limites do modelo.

## 7 SIMULAÇÃO NUMÉRICA E RESULTADOS OBTIDOS

Para a validação do modelo hidrogeológico conceitual proposto, foi realizada uma simulação numérica aplicando-se o MEF. A escolha desse método numérico deve-se à flexibilidade dos elementos finitos em adaptar-se a geometrias complexas e permitir o refinamento e ajuste da malha nos locais de maior interesse, reduzindo as dispersões e instabilidades numéricas (STOLLBERG, 2013).

O domínio simulado possui área de 22.695 km<sup>2</sup> e volume de 2.954 km<sup>3</sup>, apresentando geometria complexa, discretizado em 486.037 elementos finitos triangulares e 492.172 nós, contidos em uma única camada. As drenagens e a topografia do domínio foram obtidas a partir do processamento do

modelo digital do terreno (SRTM), com resolução de 90 metros, disponibilizados pelo web site (<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download>) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). A base do domínio modelado foi gerada a partir da interpolação de dados disponíveis em CPRM e UFBA (2007a) e dados obtidos nos afloramentos visitados durante as etapas de campo. No intuito de evitar instabilidades numéricas, a espessura mínima do modelo foi estipulada em 30 metros, enquanto a espessura máxima em 240 metros.

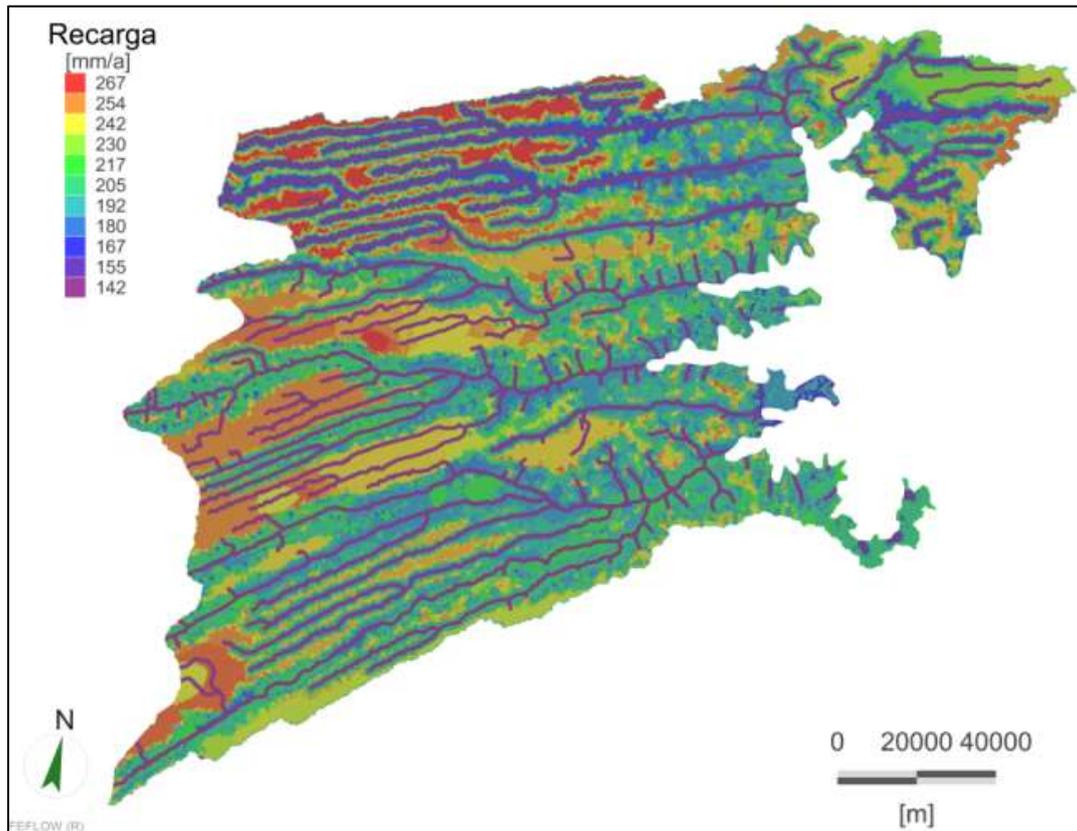
Devido a ausência de dados históricos dos níveis d'água para a área estudada, foram compilados dados de 22 poços de observação de Gaspar (2006) para a calibração da carga hidráulica da simulação. A malha numérica foi refinada nas fronteiras do domínio, nas drenagens e nos poços de observação.

A previsão de fluxo nulo nos limites do Sistema Aquífero Urucuia, estabelecida pelo modelo conceitual, é imposta automaticamente pelo *software* FEFlow, determinando que não haja conectividade do fluxo além dos limites do modelo. A condição de contorno de carga especificada (Dirichlet BC) foi aplicada às drenagens que cortam o sistema aquífero, sendo seus valores admitidos como a superfície topográfica desses nós. Atendendo à premissa de que as drenagens comportam-se, majoritariamente, como zonas de descarga, foi estipulada a condição de *seepage face* para as condições de contorno de primeiro tipo.

A calibração do modelo hidrogeológico deu-se pelo ajuste dos parâmetros de condutividade hidráulica e recarga, até que a carga hidráulica simulada apresentasse alta correlação com a carga hidráulica dos poços de observação. O ajuste dos parâmetros hidrogeológicos baseou-se nos valores de taxas de recarga e parâmetros hidrodinâmicos apresentados nas tabelas 1 e 2. O valor estimado pela simulação numérica para condutividade hidráulica, nas três direções vetoriais, foi  $K_x=K_y=K_z= 9,7 \times 10^{-5}$  m/s. Considerou-se que os valores de condutividade hidráulica obtidos por Gaspar (2006) para os poços

1953, 1907, 1976 e 950 (Tabela 2) podem ocorrer em porções localizadas do SAU, com variações faciológicas e/ou zonas silicificadas, sem, contudo, representar os parâmetros hidrodinâmicos regionais do sistema aquífero. Os valores de recarga variam de 267 mm/a, principalmente nas regiões aplainadas

da bacia, a 142 mm/a, em regiões de maior inclinação e/ou próximas às drenagens (Figura 3). A fim de evitar elevados contrastes na distribuição da recarga, e conseqüentemente instabilidades numéricas, foi aplicado o método de interpolação do inverso da distância ponderada (IDW) aos valores de recarga.

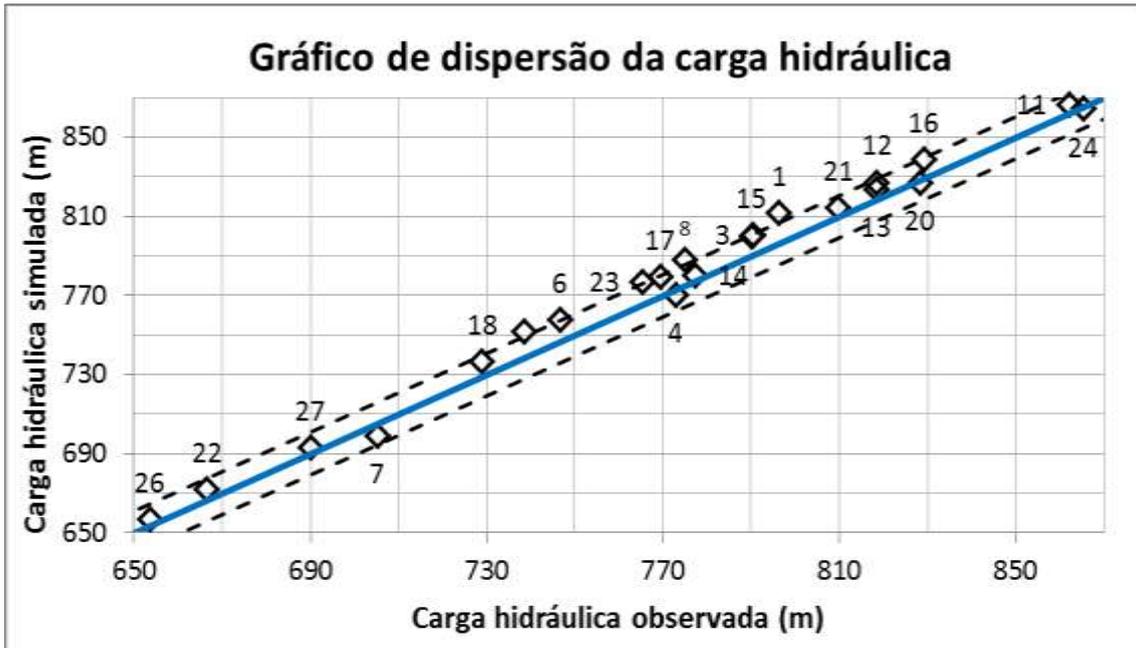


**Figura 3** – Distribuição espacial das taxas de recarga  
**Figure 3** – Spatial distribution of recharge rates

Os resultados de calibração da simulação em regime permanente são apresentados na tabela 3; os critérios normalizados correspondem à razão entre os valores obtidos na calibração e o gradiente hidráulico do modelo. Destacam-se, entre eles, o baixo valor do RMS normalizado e os altos coeficientes de determinação e correlação, 99,1% e 99,5%, respectivamente, entre as cargas hidráulicas simuladas e as reais (Figura 4). Esses resultados atestam a representatividade

do modelo simulado, uma vez que os valores estimados de condutividade hidráulica e recarga representam, de forma fidedigna, as cargas hidráulicas nos poços de observação.

A disponibilização de dados de monitoramento do nível d'água, do escoamento de base e das vazões explotadas no aquífero permitiriam incorporá-los ao modelo e resultariam em maior acurácia na calibração da simulação, além de possibilitar a confecção de um modelo em regime transiente.



**Figura 4** - Dispersão dos valores de carga hidráulica simulados e observados. A linha azul representa a dispersão ideal das cargas hidráulicas; as linhas tracejadas representam os valores de RMS normalizado de 5%

**Figure 4** - Scatter plot of hydraulic head values. The blue line represents the ideal dispersion of hydraulic head; the dashed lines represent the normalized RMS values of 5 %

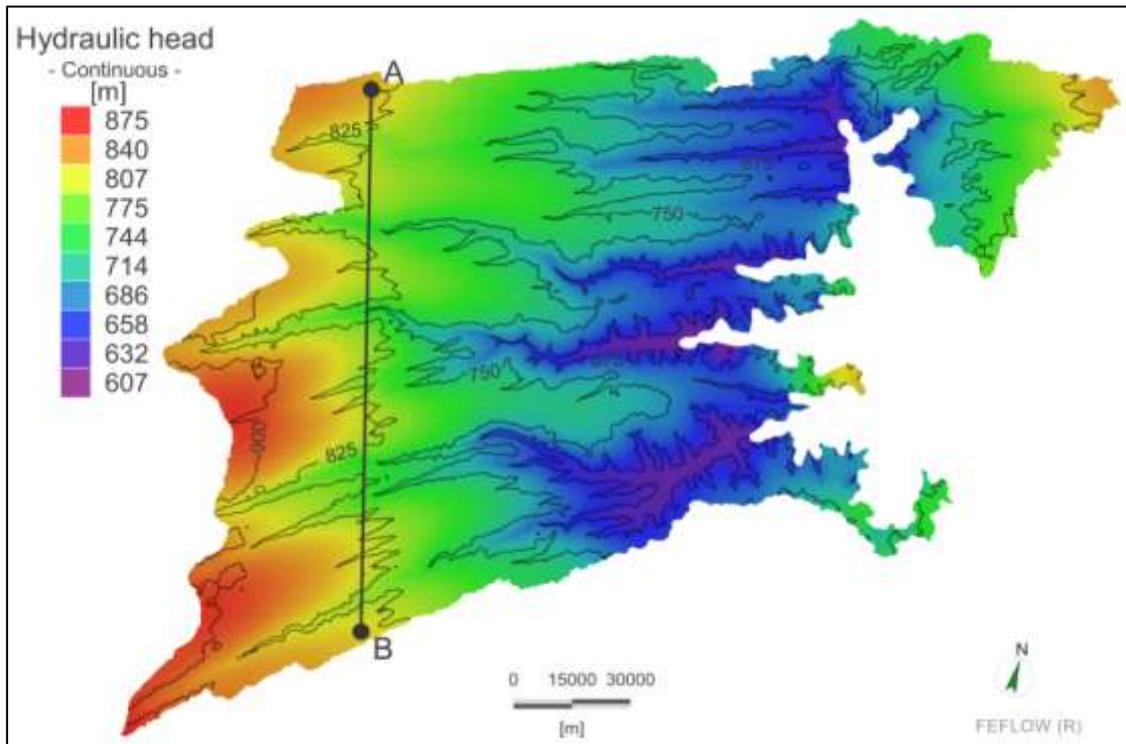
**Tabela 3** – Valores obtidos na calibração da simulação

**Table 3** - Calibration parameters of the simulation

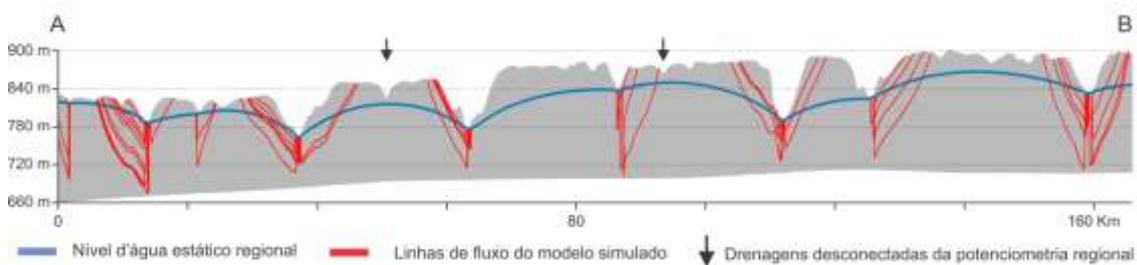
Critério de calibração	Valor obtido na calibração	Valor normalizado
RMS	8,43 m	3,15%
Resíduo máximo	15,29 m	5,70%
Resíduo mínimo	1,05 m	0,39%
Resíduo médio absoluto	7,33 m	2,74%
Resíduo médio	6,34 m	2,37%
Coefficiente de correlação	0,995	-
Coefficiente de determinação	0,991	-

A figura 5 apresenta a distribuição espacial das cargas hidráulicas simuladas e as curvas de nível do domínio simulado. A pontecimetria segue grosso modo a topografia, evidenciando o caráter livre do aquífero. A figura 6 apresenta um perfil norte-sul do SAU, indicando as linhas de fluxo obtidas a

partir da simulação. Esse perfil evidencia que os níveis d'água das drenagens menos dissecadas, indicadas na figura 6, são distintos da pontecimetria regional calculada pelo FE-Flow, sugerindo que as vazões dessas drenagens são mantidas por aquíferos sustentados por zonas silicificadas.



**Figura 5** – Topografia (isolinhas em preto) e a distribuição espacial da carga hidráulica simulada  
**Figure 5** – Topography (black isolines) and the spatial distribution of simulated hydraulic head

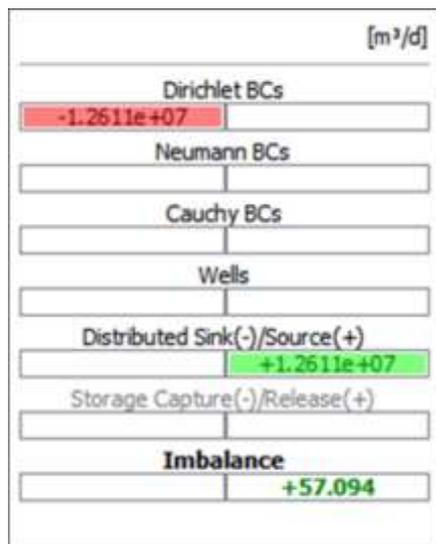


**Figura 6** – Perfil norte-sul (A-B, figura 5) representando o nível freático, as linhas de fluxo obtidas a partir da simulação do modelo hidrogeológico e as drenagens desconectadas da potenciometria regional

**Figure 6** – North-south cross-section (A-B, figure 5) showing water level, the flow lines obtained from the simulation of the hydrogeological model and the disconnected streams from the regional water level

A quantificação das taxas de entrada e saída de água do modelo está apresentada na figura 7. O fluxo de água escoado pelas condições de contorno é de  $1,26 \times 10^7$  m<sup>3</sup>/d, equivalente a 145 m<sup>3</sup>/s ou a uma lâmina média d'água de 203 mm/a, e representa o fluxo de base do domínio simulado. O fluxo total de entrada de água no modelo é de  $1,26 \times 10^7$  m<sup>3</sup>/d, estimando-se, assim, uma recarga média de 203 mm/a. O balanço total corresponde à somatória dos fluxos de entrada e saída do modelo e representa o armazenamento ou

evasão de água do aquífero. O balanço total simulado de 57,09 m<sup>3</sup>/d, correspondente a 0,045% do fluxo total, está em concordância com a premissa de balanço total igual a zero para simulações em regime permanente. A exploração de água subterrânea não foi considerada no modelo devido à inacessibilidade dos dados de outorga, operação e vazão dos poços de bombeamento, impossibilitando avaliar sua influência no balanço hídrico e na dinâmica do aquífero.



**Figura 7** – Balanço hídrico obtido pela simulação  
**Figure 7** – Water flux balance obtained by the simulation

Com a finalidade de avaliar o grau de dependência e as incertezas dos parâmetros utilizados na calibração do modelo, foram realizadas simulações reduzindo em 20% os valores de recarga, condutividade hidráulica horizontal ( $K_{xy}$ ) e condutividade hidráulica vertical ( $K_z$ ). A razão entre a variação do valor de RMS normalizado e a variação dos parâmetros de entrada do modelo, denominado de coeficiente de sensibilidade, avalia a sensibilidade do modelo em relação ao parâmetro analisado. A tabela 4 apresenta os valores de RMS normalizado e o coeficiente de sensibilidade para cada cenário simulado.

Entre os parâmetros avaliados, a condutividade hidráulica vertical ( $K_z$ ) apresenta reduzido coeficiente de sensibilidade, evidenciando o baixo grau de dependência do

modelo a esse parâmetro. Por outro lado, a recarga e a condutividade hidráulica horizontal ( $K_{xy}$ ) apresentam coeficientes de sensibilidade elevados, indicando que as principais incertezas do modelo estão associadas a esses parâmetros e que, conseqüentemente, pequenas variações em seus valores resultam em perturbações significativas na calibração do modelo.

Devido à homogeneidade do modelo, as alterações realizadas nos parâmetros de entrada resultam em influências generalizadas por todo o domínio, elevando os coeficientes de sensibilidade. Do mesmo modo, a supressão dos dados de bombeamento contribui para o aumento do grau de dependência do modelo em relação aos parâmetros de recarga e condutividade hidráulica.

**Tabela 4** – Valores de RMS normalizado e coeficiente de sensibilidade resultantes da análise de sensibilidade  
**Table 4** – RMS normalized and sensitivity coefficient values resulting from the sensitivity analysis

	Parâmetros analisados		
	$K_{xy}$	$K_z$	Recarga
RMS normalizado	4,96 %	3,16 %	2,35 %
Coefficiente de sensibilidade	9,08	0,08	3,99

## 8 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pela simulação do modelo hidrogeológico e os elevados índi-

ces de correlação entre os valores reais e os simulados atestam que o modelo conceitual proposto para a sub-bacia hidrogeológica leste do SAU, na bacia do rio Corrente, pos-

sui representatividade diante das condições reais do sistema aquífero. Pode-se, dessa maneira, confirmar a natureza homogênea e isotrópica do SAU. Em escala regional, as pequenas variações litológicas presentes no Grupo Urucuia podem ser desprezadas e não apresentam influências significativas na dinâmica do fluxo de águas subterrâneas. Contudo, para estudos de maior detalhe, as porções silicificadas podem alterar os parâmetros e a dinâmica local do aquífero.

## REFERÊNCIAS

AMORIM JUNIOR, V. **Avaliação Hidrogeológica do aquífero Urucuia na bacia do rio das Fêmeas-BA usando IP-Resistividade**. Salvador, Bahia, Brasil, 2003. 82 p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Subprojeto 4.5C** – Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco - PBHSF (2004-2013). Nota técnica. Disponibilidade hídrica quantitativa e usos consuntivos na bacia hidrográfica do rio São Francisco. Brasília, 71 p. 2004.

ARRAES, T. de M. **Proposição de critérios e métodos para delimitação de bacias hidrogeológicas**. Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2008. 94 p. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília.

BARLOW, P. M. **Use of Simulation-Optimization Modeling to Assess Regional Ground-Water Systems**: U.S. Geological Survey Fact Sheet 3095, 2005.

BUENO, R. M. **Interpretação paleoambiental de paleossolo do Grupo Urucuia (Cretáceo Superior)**. Campinas, São Paulo, Brasil, 2012. 83p. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas.

CAMPOS, J. E.; DARDENNE, M. A. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo, v. 27, n. 3, p. 269-282, 1997.

CAMPOS, J.C.V.; OLIVEIRA, L.T.; LUZ, L. D.; LEAL, L.R.B.; LUZ, J.A.G.; LIMA, O.A.L. Avaliação da recarga do aquífero Urucuia na região de Jaborandi – Oeste da Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14, 2006, Curitiba. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2006.

CHANG, H.K.; SILVA, F. P. Contribuição ao arcabouço geológico do sistema aquífero Urucuia. **Revista Geociências**. São Paulo, v. 34, n. 4, p. 872-882, 2015.

O valor do escoamento de base obtido na simulação do modelo, 145 m<sup>3</sup>/s, representa 17% da vazão de permanência (Q<sub>95</sub>) do rio São Francisco, estimada por ANA (2004), e confirma a efetiva participação do SAU no fluxo das águas para a bacia hidrográfica do rio São Francisco, denotando sua importância para a manutenção da vazão do rio São Francisco.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS E UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA - CPRM e UFBA. **Comportamento das bacias sedimentares da região semi-árida do Nordeste Brasileiro**. Hidrogeologia da bacia sedimentar do Urucuia: Bacias hidrográficas dos rios Arrojado e Formoso – Meta B – Caracterização Geológica e Geométrica dos Aquíferos. Salvador: 2007a.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS E UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA - CPRM e UFBA. **Comportamento das bacias sedimentares da região semi-árida do Nordeste Brasileiro. Hidrogeologia da bacia sedimentar do Urucuia**: Bacias hidrográficas dos rios Arrojado e Formoso – Meta C – Caracterização hidrogeológica dos Aquíferos. Salvador. Salvador: 2007b.

DIERSCH, H.J.G. **FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media**. Berlin: Springer, 2014.

FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2001.

GASPAR, M. T. P. **Sistema aquífero Urucuia: caracterização regional e propostas de gestão**. Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2006. 158 p. Tese (Doutoramento em Geologia) – Universidade de Brasília.

LUZ J.A.G.; COSTA A.T.; CAMPOS J.C.V. **Avaliação sobre as condições atuais de exploração dos poços e dinâmica de fluxo do aquífero Urucuia**. Relatório Final. Universidade Federal da Bahia – UFBA. Barreiras-BA. 2009.

NASCIMENTO, K. R. F. **Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco** – ANA/GEF/PNUMA/OEA. Subprojeto 3.2 - Uso Conjunto das Águas Subterrâneas da Sub-Bacia do Rio das Fêmeas – BA. Resumo executivo do relatório final. Salvador: 2003.

NEUMAN, S.P. Analysis of pumping test data from

- anisotropic unconfined aquifer considering delayed gravity response. **Water Resources Research**, 11:329-342. 1975.
- PIMENTEL, A. L.; AQUINO, R. F.; SILVA, R. C. A. e VIEIRA, C.M.B. Estimativa da recarga do aquífero Urucuia na sub-bacia do rio das Fêmeas – Oeste da Bahia, utilizando separação de hidrogramas. IN: Congresso sobre aproveitamentos e Gestão de Recursos Hídricos em Países de Idioma Português, 2000. **Anais...** Rio de Janeiro, 1, p.27 – 37, 2000.
- SCHUSTER, H.D.M; SILVA,F.F da; TEIXEIRA,S.L.; BATISTA,L.H.G e FREITAS, W.A. Estudos Hidrogeológicos do Aquífero Urucuia no Oeste baiano para Obtenção de Parâmetros nas outorgas de mananciais Subterrâneos. In: ABAS, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Santa Catarina. **Anais...** 12, 2002.
- SCHUSTER, H.D.M. Contrato n° 034/2003-SRH/PGRH/BIRD. **Modelagem de Fluxo Subterrâneo com Vistas à Definição do Distanciamento entre Poços e Mananciais no Oeste Baiano** - Relatório Final. Salvador, 2003.
- SEPÚLVEDA , N.; TIEDEMAN, C. R.; O'REILLY, A.M.; DAVIS, J.B.; BURGER, P. Groundwater Flow and Water Budget in the Surficial and Floridan Aquifer Systems in East-Central Florida: U.S. Geological **Scientific Investigations Report** 5161, 214 p. 2012.
- SPAGNOLO, T. F. O.; GOMES, R.A.T.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F.; Martins, E. S.; COUTO JÚNIOR, A.F. Dinâmica da expansão agrícola do município de São Desidério-BA entre os anos de 1984 a 2008, importante produtor nacional de soja, algodão e milho. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, v. 2, p. 603-618, 2012.
- SPIGOLON, A. L. D.; ALVARENGA, J.S. Fácies e elementos arquiteturais resultantes de mudanças climáticas em um ambiente desértico: Grupo Urucuia (Neocretáceo), Bacia Sanfranciscana. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 32, p. 579-586. 2002.
- STOLLBERG, R. **Groundwater Contaminant Source Zone Identification at an Industrial and Abandoned Mining Site – A Forensic Backward-In-Time Modelling Approach**. Halle, Sachsen-Anhalt, Germany, 2013. 183 p. Tese de doutoramento em hidrogeologia. Leipzig Universität.