

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS ANALÍTICOS PARA MODELAGEM DO FLUXO HÍDRICO SUBTERRÂNEO NO AQUIFERO DA REGIÃO DO VALE DO CARIRI - CEARÁ - BRASIL

Carisia Carvalho Gomes¹ & Marco Aurélio Holanda de Castro²

Resumo - O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para a aplicação ou utilização do Método de Elementos Analíticos para a modelagem matemática de fluxo hídrico subterrâneo em aquíferos regionais. A área de interesse real escolhida para esta aplicação é a região inserida no Vale do Cariri, localizada ao sul do Estado do Ceará e que é composta pelos municípios de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha. As razões que levaram a escolha desta área devem-se aos fatos dela possuir uma das maiores reservas de água subterrânea em rocha sedimentar do Estado do Ceará e, também, porque o abastecimento público de água potável das cidades citadas acima é feito quase que totalmente (95%) com água de origem subterrânea. Este último fato induz a problemas relativos a intensa exploração do aquífero associados com outros problemas de poluição ambiental. Questões relacionadas ao grau de confiança no modelo, sua susceptibilidade, adequação e precisão são respondidas através do uso simultâneo, na região, do método de elementos analíticos, através do uso do programa SPLIT/VISUALBLUEBIRD(VBB) e do método de diferenças finitas, através do programa MODFLOW.

Abstract - The main objective of this work is to develop a methodology for the use of the analytic element method for mathematical groundwater flow modeling of regional aquifers of Northeastern Brazil. An area of real interest was chosen in the region of Cariri Valley, located in the Ceará State, Brazil and composed of the cities of Crato, Juazeiro do Norte and Barbalha. This region has one of the largest groundwater resources in sedimentary rock of the State and the cities public water supply is done almost totally (95%) with groundwater, inducing groundwater intense exploitation problems allocated with environmental pollution. Questions related to the degree of reliability, suitability,

¹ Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará-Campus do Pici – Centro de Tecnologia – Bloco 713 - 1º andar – CEP - 60.451-970 – Fortaleza – CE – Brasil – telefone: (85) 288-9776 – fax: (85) 288-9627 - carisia@ufc.br

² Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará - Campus do Pici – Centro de Tecnologia – Bloco 713 - térreo – CEP - 60.451-970 – Fortaleza – CE – Brasil - telefone: (85) 288-9776 – fax: (85) 288-9627 - marco@ufc.br

adequacy and accuracy are answered through the simultaneous use, in the same region, of the analytic element method - SPLIT/VBB and the finite difference method – MODFLOW.

Palavras-chave - água subterrânea, modelagem matemática, método de elementos analíticos

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de técnicas de exploração dos recursos naturais de água subterrânea e a manutenção de sua qualidade estão recebendo um significativo aumento da atenção por parte das autoridades públicas devido à constante ameaça potencial de contaminação do meio ambiente resultante das atividades industriais, deposição de lixo, atividades agrícolas, etc. Esta preocupação atinge, em especial, a população da região semi-árida do Nordeste Brasileiro que, além do problema agravante da poluição, enfrenta, há séculos, outros graves problemas ligados à falta de água, que acontece durante períodos de chuvas escassas ou até mesmo inexistentes. Neste estágio os pequenos mananciais superficiais geralmente secam e os grandes reservatórios chegam a atingir níveis críticos. Isto causa, muitas vezes, o colapso no abastecimento de água e, como conseqüência, as populações ficam submetidas a racionamento de água, falta de alimentos, emigração da população afetada para os centros urbanos e, resultante deste panorama, a degradação na qualidade de vida das pessoas.

Para estes problemas de escassez e poluição da água, tanto o Governo Federal como os Estaduais, entre outras medidas emergenciais durante os períodos de seca, costumam promover programas de perfuração de poços na tentativa de aumentar a oferta de água. Como resultado destes programas existe uma significativa quantidade de poços profundos explorando o aquífero. O volume explotável de um aquífero é uma variável de decisão a ser determinada como parte de um plano de gerenciamento de água como um todo. Sendo necessário o desenvolvimento de modelos de simulação que forneçam informações sobre a resposta do sistema regional de água subterrânea a bombeamentos e recarga artificial e modelos de otimização.

O objetivo principal deste trabalho é dar uma contribuição para a solução dos problemas que envolvem a modelagem matemática de fluxo hídrico subterrâneo através do desenvolvimento de uma metodologia conveniente para a aplicação do Método de Elementos Analíticos no aquífero regional do Cariri.

Um objetivo específico é mostrar a comprovação do grau de confiabilidade do modelo através de uma análise comparativa dos resultados das modelagens, de um mesmo aquífero, aplicando o modelo analítico (SPLIT e VBB) e um modelo numérico tradicional que utilizam o método de

diferenças finitas (MODFLOW) simultaneamente. O aquífero escolhido para esta comparação pertence à Região do Cariri, que envolve os municípios de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha, inserida na Chapada do Araripe e grande parte do Vale do Cariri, localizada na Bacia do Araripe, sul do Estado do Ceará, Nordeste do Brasil, sendo a área de interesse o Vale do Cariri.

MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente, o método de elementos analíticos é aplicado a área total de estudo, em seguida, a uma parte desta região, chamada de área de interesse, ambas definidas na Figura 1. A região mencionada compreende a área total dos 3 municípios e a área de interesse é o Vale do Cariri, onde ocorre a maior concentração de exploração do aquífero. Na área de interesse é aplicado também um modelo numérico de diferenças finitas. A aplicação dos dois modelos na mesma área de interesse é feita para atender objetivos específicos da modelagem, tais como a simulação da influência da interação da água superficial e subterrânea no comportamento do fluxo subterrâneo com a definição das cargas hidráulicas do aquífero.

Existem várias razões que levam a escolha desta área especial, a primeira e mais importante deve-se ao fato dela ser constituída de rochas sedimentares, representadas por arenitos, siltitos, argilitos e calcários, ressaltando-se os arenitos, possuindo os melhores sistemas aquíferos do Estado, onde estão armazenadas reservas significativas de água subterrânea, de boa qualidade, abastecendo quase que 95% dos municípios através de poços tubulares. A outra razão é baseada em estudos anteriores realizados, como por exemplo, por MENDONÇA (1996), que demonstrou a preocupação com a exploração desordenada das águas subterrâneas no município de Juazeiro do Norte, por estar comprometendo o potencial quantitativo e qualitativo do aquífero que está localizado em zonas de alto risco de poluição ambiental. Um outro estudo realizado por SANTIAGO et al. (1996), utilizando medidas isotópicas nas águas subterrâneas da região, concluiu que as águas bombeadas por alguns poços são misturas de paleoáguas (entre 08 e 12 mil anos de idade) com águas pluviais recentes infiltradas diretamente no Vale, sendo que a maioria das águas captadas no município de Juazeiro do Norte ou são misturas de águas pluviais recentes armazenadas na Formação Rio da Batateira ou misturas de diferentes graus de águas infiltradas na Formação Rio da Batateira com paleoáguas da Formação Missão Velha.

Modelagem utilizando o método de elementos analíticos e o método de diferenças finitas

Para o modelo analítico foram utilizados o SPLIT (JANKOVIC', 2001), Versão 2.3, 2001 e o VISUALBLUEBIRD, Versão 28/08/2002, (CRAIG, 2002) que estão disponíveis em <<http://www.groundwater.buffalo.edu>> e para o modelo numérico o programa Visual MODFLOW para Windows, Versão 2.7 (MCDONALD; HARBAUGH, 1988).

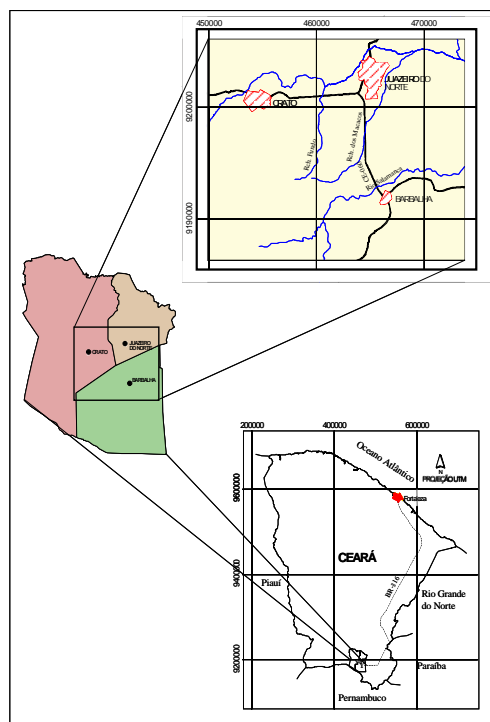


Figura 1. Localização das áreas de estudo (regional e de interesse) - Cariri – Ceará

Material: caracterização da área de estudo

A área da região é igual a 1.788,4 km²: Crato (1.117,5 km²), Juazeiro do Norte (219 km²), e Barbalha (451,9 km²). A área de interesse fica a 538 km da capital do Estado do Ceará, Fortaleza, entre as coordenadas 07° 10' e 07° 25' S, 39° 10' e 39° 30' W Gr (Figura 1), sendo constituída por parte dos municípios de Crato (CRA), 170 km², Juazeiro do Norte (JU), 102 km² e Barbalha (BAR), 158 km², perfazendo uma área total de aproximadamente 430 km².

A formação geológica é composta de rochas sedimentares, datando desde o Siluro-Devoniano até o Cretáceo e uma pequena parte de rochas pré-Cambrianas. A Formação Rio da Batateira ocorre por todo o Vale do Cariri, ocupando 70% da área (301 km²) e onde está localizada a maioria dos poços selecionados para este estudo. A Região do Cariri caracteriza-se por duas unidades geomorfológicas principais: o Planalto Sertanejo (zona de pediplano) e a Chapada do Araripe (zona de chapada). O Planalto apresenta-se em forma semicircular com cotas médias em torno de 400 metros, bordejando o alto relevo da Chapada, com altitude média de 850 metros. A Chapada apresenta relevo de topo plano; drenagem de fraca intensidade e os níveis d'água estão muito profundos, oferecendo dificuldade a sua captação através de poços.

Existe na Região uma distribuição de ocorrência de vários tipos de clima desde o úmido, superúmido, semi-árido e árido. A precipitação média anual é de 1.060 mm, sendo que para a área do Vale do Cariri é de 970 mm, aquém da evapotranspiração potencial de 1.469 mm. A estação úmida é no período de janeiro a abril gerando excedente hídrico, enquanto que a estação seca apresenta déficit hídrico.

A drenagem superficial da região encontra-se inserida na bacia hidrográfica do Jaguaribe, sub-bacia do Rio Salgado sendo formada pelos rios Bastiões, Cariús e Salgado que atravessam todo o Cariri; o Rio da Batateira (corta a cidade do Crato e fica às margens de Juazeiro do Norte na parte oeste e norte), o Riacho dos Macacos (fica às margens Juazeiro do Norte na parte leste), o Grangeiro, Salgadinho e Carás localizam-se na região compreendida entre Crato e Juazeiro do Norte e os Rios Salamanca e Santana em Barbalha, todos eles deságuam no Rio Salgado. Esta drenagem é parcialmente alimentada pelas fontes perenes da borda da Chapada do Araripe que contribuem para a formação dos rios oriundos dela. Os açudes principais da região são: Açude Manuel Balbino (Juazeiro do Norte) com capacidade de 37.180.000 m³, barrando o Riacho dos Carneiros e Açude Thomás Osterne (Crato) com capacidade de 28.780.000 m³, que barra o Rio Carás.

A formação geológica do Vale do Cariri (área de interesse) apresenta descontinuidades laterais que são provocadas por intenso fraturamento tectônico definido pelo DNPM (MONT'ALVERNE et al., 1996) que mostra a existência de “grabens” e “horsts” que se sucedem ao longo do Vale. Esta variação de altos e baixos sucessivos influencia na quantificação das reservas hídricas subterrâneas, sobretudo devido à ausência de dados de poços tubulares na área. Foram inventariados pelo DNPM, 293 exutórios naturais no Estado do Ceará, localizadas nas vertentes da Chapada do Araripe e com vazão média em torno de 18 m³/h.

Os valores médios dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero (sistema aquífero médio) são os seguintes: para a transmissividade (T) do aquífero confinado: $7,9 \times 10^{-3}$ m²/s; para a condutividade hidráulica (k): $7,32 \times 10^{-5}$ m/s; o coeficiente de armazenamento (S): $1,36 \times 10^{-3}$ e a porosidade efetiva (n_e): 20 %.

Os valores correspondentes à reserva, disponibilidades e potencialidade dos sistemas aquíferos da área de interesse são: reserva permanente: $5,31 \times 10^9$ m³; reserva reguladora: 260.500 m³/dia; disponibilidade efetiva: 263.800 m³ /dia; disponibilidade atual: 140.000 m³/dia e potencialidade: 290.000 m³ /dia.

Estima-se que existam mais de 1.200 poços tubulares executados na sub-bacia do Salgado, dentro da Região do Cariri. Foi inventariado, por Veríssimo (1999), um total de 548 poços na área de interesse que estão distribuídos na proporção de 25,2 % em Barbalha, 32% no Crato e 42,8% em Juazeiro do Norte, com densidade de 1,3 poço/km², compreendendo poços em situação de uso ou abandonados e do tipo privado ou público. A totalidade dos poços da unidade hidro-estatigráfica 3 (sistema aquífero médio) possui valores médios de profundidade e capacidade específica de 88 m e 2,7 (m³/h)/m respectivamente, produzindo as maiores vazões de bombeamento observadas na área, chegando até 300 m³/h no município do Crato. A taxa média de consumo “per capita” na região aproximada a 340 l/hab./dia.

A modelagem da Região, compreendendo a área total dos três municípios (1.788,4 km²), considera a inclusão dos seguintes elementos hidrológicos: 50 poços de abastecimento público, 44 fontes naturais localizadas no sopé da Chapada do Araripe, apenas nos municípios de Crato e Barbalha, com vazão total de 2.364 m³/h; 02 lagos (açudes) e 19 cursos d'água, entre rios e riachos. O mapa detalhado de parte da região correspondente a área de interesse (430 km²), utilizado como base para a análise comparativa, pode ser encontrado na Figura 4. Este mapa contém as curvas de nível, a localização das sedes dos municípios de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha, a localização dos 50 poços selecionados, caracterizando as baterias de poços existentes em cada município e o traçado dos principais rios (2) e riachos (2) que escoam dentro da área de interesse.

Dados de entrada

As propriedades do aquífero são as mesmas tanto para a modelagem em escala regional como local (área de interesse) que são: cota da base do aquífero [L] = 0 m (referência de nível); espessura do aquífero (saturada) [L] = 110 m; condutividade hidráulica regional [L/T] = 7.32×10^{-5} m/s = 0,264 m/h (valor utilizado no modelo) e porosidade efetiva = 0,2 ou 20%.

Os pontos de cargas observadas são os pontos com cargas hidráulicas médias escolhidos em locais estratégicos do domínio do fluxo subterrâneo. Os valores numéricos utilizados são os disponíveis na relação dos poços construídos dentro da área de interesse. São utilizadas séries de elementos analíticos distintos para cada tipo de modelagem: para a área de interesse com 50 poços e com 166 poços e para a Região compreendendo a área total dos três municípios.

Para a área de interesse os elementos analíticos utilizados são os seguintes: para a primeira simulação: 50 poços tubulares no sistema aquífero médio com taxas de bombeamento [L³T⁻¹] conhecidas; 02 rios e 02 riachos, de carga hidráulica [L] e gradientes, i , [LL⁻¹] conhecidos - Rio da Batateira: $i = 0,00122$ m/m; Rio Salamanca: $i = 0,00038$ m/m; Riacho Fundo: $i = 0,00358$ m/m e Riacho dos Macacos: $i = 0,00358$ m/m. Para a segunda simulação: os elementos são os mesmos utilizados na primeira simulação. A única diferença é quanto ao número de poços que aumenta para 166 poços.

Para a Região: além dos 50 poços, são considerados os lagos formados pelos Açude Thomás Osterne e Manuel Balbino e as fontes naturais, localizadas no sopé da Chapada (todas fora da área de interesse). São selecionadas 44 fontes em Crato e Barbalha, com vazões regularizadas superiores a 5 m³/h. Os rios e riachos são em número de 19 e é suposto estarem em contato direto com o nível freático, alimentando a reserva subterrânea de água. Entre os mais importantes, cita-se: Rio Carás, Rio da Batateira, Rio Salamanca, Rio Grangeiro, Rio Salgadinho, Riacho Fundo, Riacho dos Macacos, Riacho do Jardim, Riacho dos Carneiros e Riacho Santana.

O elemento área de recarga é considerado apenas para as simulações na área de interesse que possui área total [L^2] igual a 430.080.000 m^2 (25.600 m x 16.800 m). A alimentação por recarga do sistema aquífero médio é procedida de duas maneiras: por infiltração direta pelas águas das chuvas e por contribuição das fontes. O valor da taxa de recarga [LT^{-1}], segundo MONT´ALVERNE et al. (1996), devido à precipitação (970 mm/ano) na região é igual a $109,74 \times 10^6 m^3/ano$ ou ainda $1,66 l/s/km^2$. Considerando-se a contribuição (recarga), oriunda das fontes ou exutórios naturais do Sistema Aquífero Superior (Formação Exu/Arajara), que escoam superficialmente sobre os sedimentos do pediplano, propiciando uma infiltração de parte desse escoamento superficial. Este valor pode ser avaliado aproximadamente em $2,32 \times 10^6 m^3/ano$. Somando-se as duas contribuições chega-se a recarga total igual a $112,06 \times 10^6 m^3/ano$. A recarga total distribuída em toda a área de estudo (m^2) resulta na taxa de 0,0000297 m/h que é o valor utilizado na modelagem.

A seleção dos poços para a modelagem regional e para a primeira local reduz o número de 548 poços para o total de 50 unidades, obedecendo aos seguintes critérios: em primeiro lugar são descartados os poços que estão fora de uso, não instalados, sem dados suficientes ou abandonados; em segundo lugar são selecionados apenas os poços públicos que são utilizados para abastecimento público dos três municípios e como terceiro critério são escolhidos aqueles que têm vazões de bombeamento maiores que $12 m^3/h$. Para a próxima fase de modelagem, ou seja, aplicação na área de interesse, o número de poços é aumentado para 166, incluindo-se, neste caso, todos poços em uso, privados para irrigação e para usos múltiplos, com vazão de bombeamento maior que $10 m^3/h$.

A modelagem utilizando o programa MODFLOW é realizada apenas para a área de interesse com 50 poços objetivando a análise comparativa entre os resultados dos dois modelos. Os dados de entrada utilizados para o método numérico são os mesmos para o método analítico. As diferenças que merecem ser destacadas são as seguintes: os rios (2) e os riachos (2) entram como condição de contorno do tipo carga constante especificada em todo os seus percursos e a discretização do domínio que resulta numa malha de 300×300 unidades, ficando o tamanho da célula aproximadamente igual a 85×56 metros (área = $4.760 m^2$).

RESULTADOS

A Figura 2 apresenta um esboço (sem escala) da Região do Cariri compreendendo a área total dos três municípios com seus respectivos componentes hidrológicos mais importantes, os dois maiores reservatórios e os cursos principais d'água, descritos no capítulo anterior. Nesta figura consta também a delimitação do perímetro da área definida como de interesse.

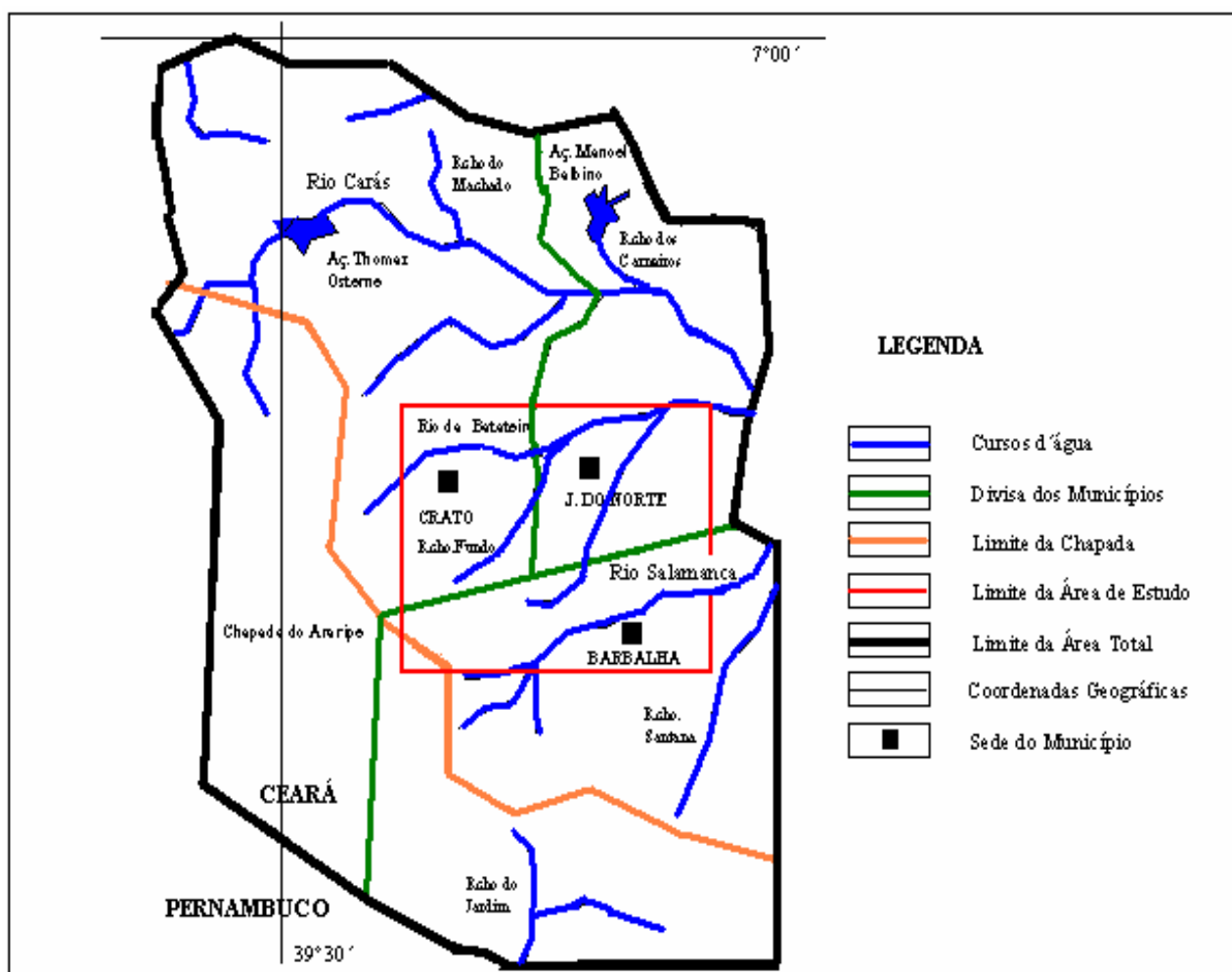


Figura 2. Croquis da Região do Cariri: Municípios de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha (sem escala)

As curvas equipotenciais calculadas pelo método de elementos analíticos, programa SPLIT/VBB, de toda região estão traçadas na Figura 3, onde é possível ter-se uma visão macro da distribuição regional das cargas hidráulicas do aquífero.

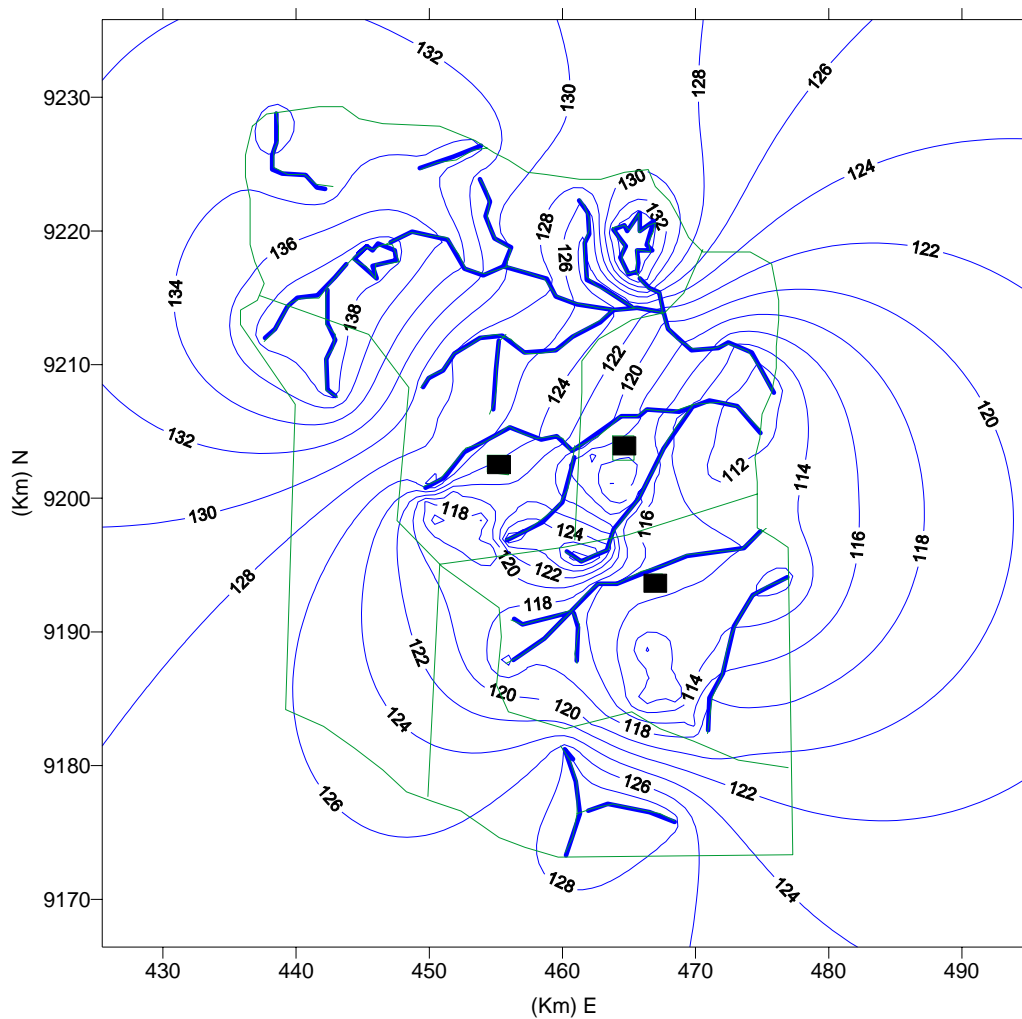


Figura 3. Curvas equipotenciais, de 2 em 2 metros, para a Região do Cariri (área total) - (SPLIT/VBB)

A Figura 4 apresenta o mapa da área de interesse, utilizada como base para a modelagem, com escala em metros, onde existe a maior concentração de poços da região e que é a área utilizada para todo o estudo comparativo com o método numérico.

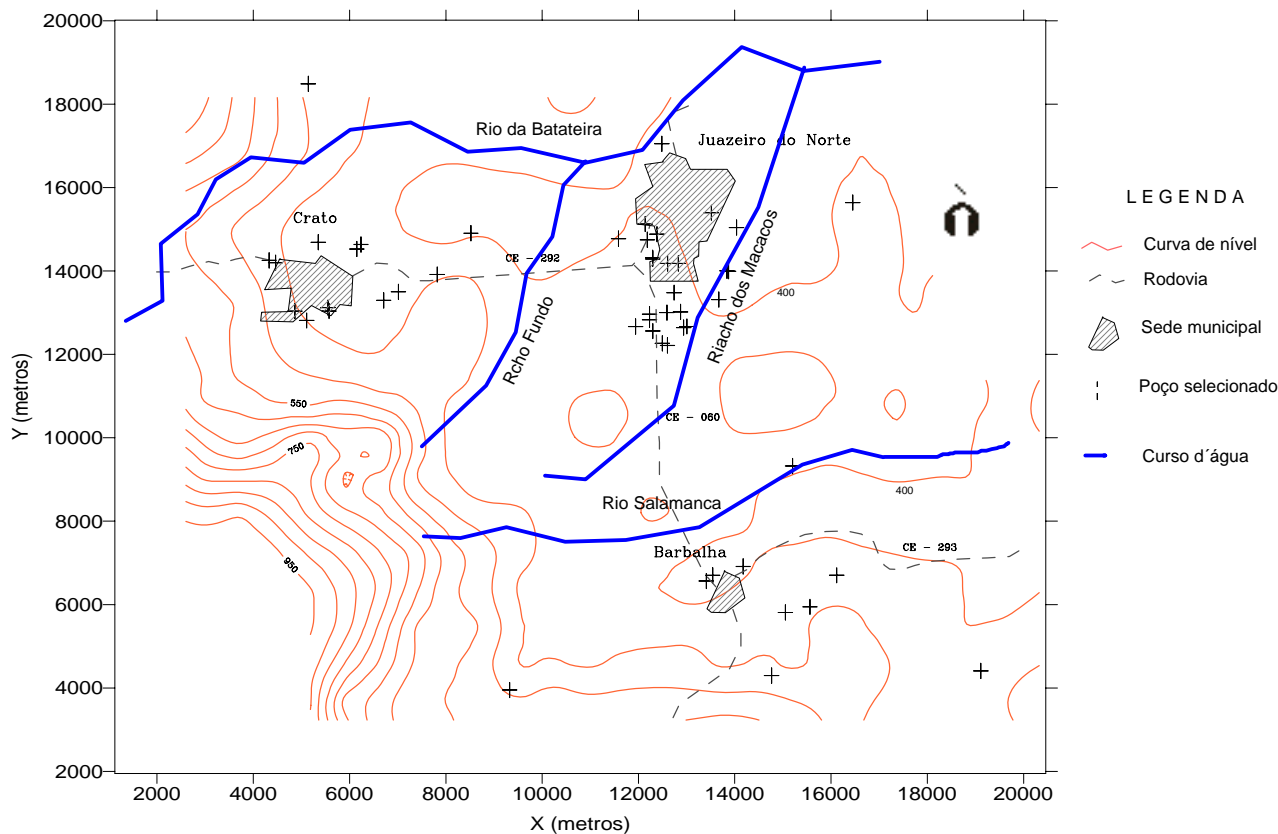


Figura 4. Mapa de base, correspondente à área de interesse com o traçado das curvas de nível

As Figuras 5 (a) e (b) têm como objetivo mostrar as mudanças ocorridas na distribuição das cargas hidráulicas no aquífero quando são utilizados mapas bases diferentes nas simulações com o modelo analítico

A diferença observada no resultado das curvas equipotenciais entre as figuras (a) e (b) deve-se ao fato de que na aplicação regional (área total) é levada em consideração a influência de um maior número de elementos, inclusive os grandes lagos e os outros rios e riachos existentes na região, enquanto que para a aplicação local, apenas um ponto de referência, de carga especificada e fora da área de interesse, é considerado. Nota-se que a diferença maior entre as curvas se destaca nos contornos da área de interesse.

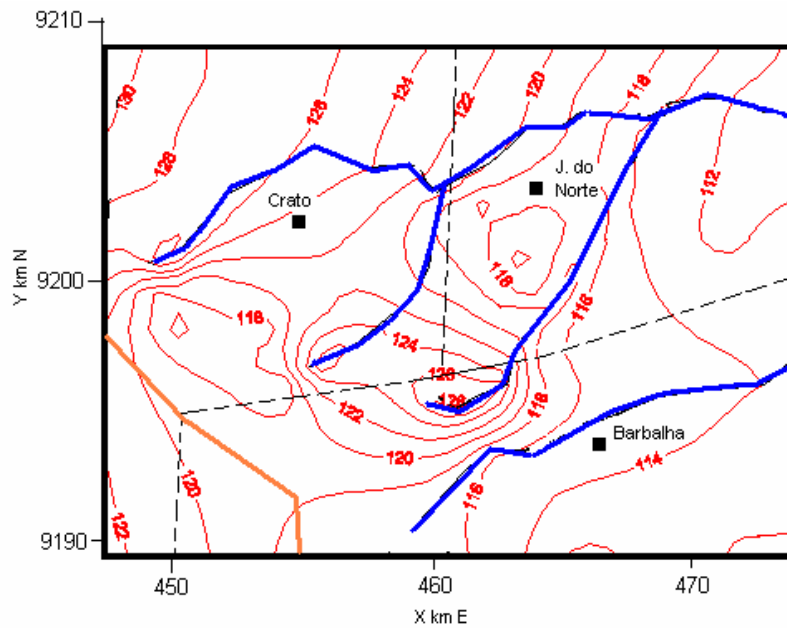


Figura 5 (a). Detalhe das cargas hidráulicas (metros) extraído da simulação regional com dimensões iguais à área de interesse (SPLIT/VBB)

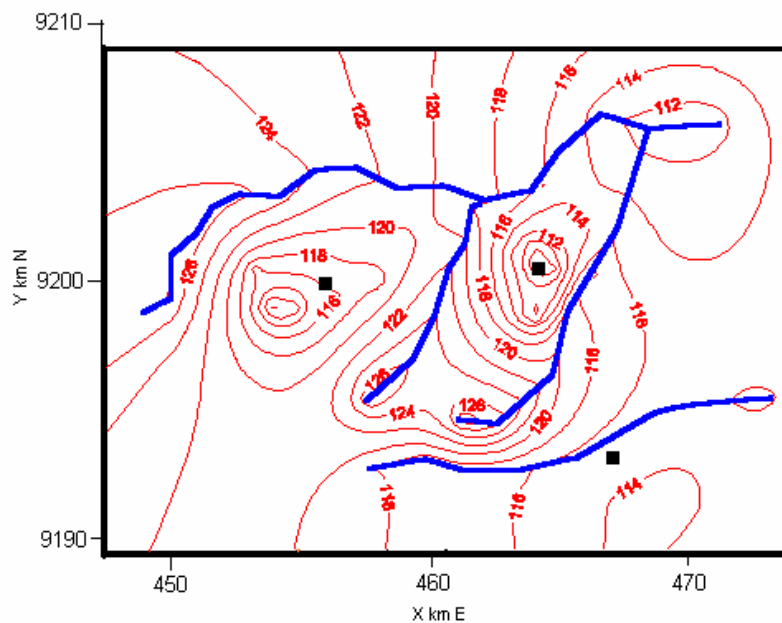


Figura 5 (b). Cargas hidráulicas (metros) na área de interesse (SPLIT/VBB)

A diferença observada no resultado das curvas equipotenciais entre as figuras (a) e (b) deve-se ao fato de que na aplicação regional (área total) é levada em consideração a influência de um maior número de elementos, inclusive os grandes lagos e os outros rios e riachos existentes na região, enquanto que para a aplicação local, apenas um ponto de referência, de carga especificada e fora da área de interesse, é considerado. Nota-se que a diferença maior entre as curvas se destaca nos contornos da área de interesse.

Além dos poços de abastecimento público, existem outros tipos de poços em uso na área que foram adicionados aos 50 primeiros aumentando o número de poços para o total de 166. A Figura 6 mostra uma comparação entre a distribuição das linhas equipotenciais para os 166 poços (esquerda) e para os 50 poços (direita).

A consideração de um maior número de poços modifica significativamente o traçado das curvas equipotenciais. O formato das linhas de mesma carga para os 166 poços simula a existência, ao invés de três baterias, apenas uma bateria maior de poços na área, levando a um rebaixamento significativo do nível freático que deverá ser avaliado pelos planejadores dos recursos hídricos da região. No caso em questão, o valor mínimo da carga hidráulica passa do valor de 104 metros, para os 50 poços, para o valor de 88 metros, correspondente aos 166 poços, ou seja, um rebaixamento médio aproximado de 16 metros, quando a vazão total de bombeamento dos 50 poços passa de $4.679 \text{ m}^3/\text{h}$ para $8.210 \text{ m}^3/\text{h}$ com os 166 poços correspondendo aos consumos anuais aproximados de $41 \times 10^6 \text{ m}^3$ e $72 \times 10^6 \text{ m}^3$, respectivamente. Estes valores representam 40 % e 64 % da recarga total do aquífero (sistema aquífero médio) que, em períodos que ocorrem precipitações fica em torno de $112 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$.

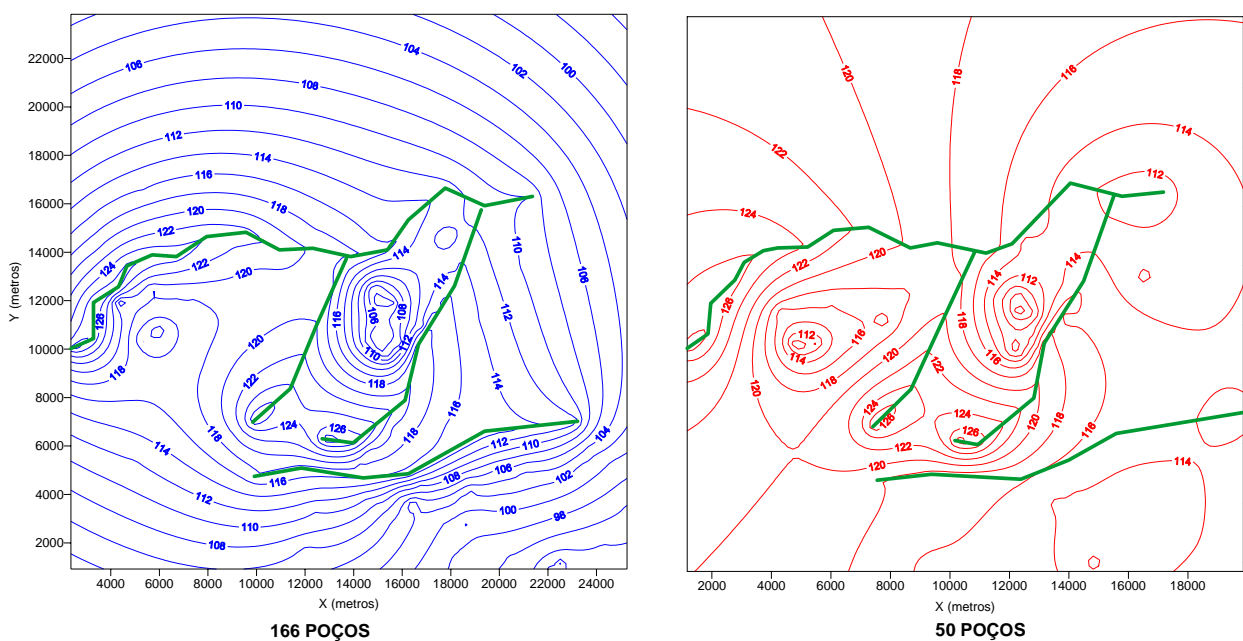


Figura 6. Comparação entre a distribuição das linhas equipotenciais (metros) para o Vale do Cariri com 166 poços (esquerda) e 50 poços (direita)

Os dados de entrada utilizados na aplicação do método de diferenças finitas, através do programa MODFLOW na área de interesse, são os mesmos utilizados no SPLIT/VBB. Diante da não disponibilidade dos dados de resistência da base dos rios, os 02 rios e os 02 riachos são representados neste modelo como condições de contorno equivalentes às cargas hidráulicas

constantes. Para esta simulação são utilizados apenas os 50 poços de abastecimento público das cidades.

A Figura 7 faz a sobreposição das linhas equipotenciais calculadas pelo SPLIT/VBB e pelo MODFLOW para embasar a análise comparativa entre os dois métodos na área de interesse.

No gráfico de sobreposição dos resultados do método de elementos analíticos e do método de diferenças finitas pode ser notado que, no modelo numérico, o valor máximo da equipotencial é igual a 130 metros e o valor mínimo é 105 metros e no modelo analítico, o valor máximo da equipotencial é igual a 129,1586 metros e o valor mínimo é 104,7554 metros, caracterizando assim uma diferença de 0,8414 m e 0,24446 m, respectivamente, entre os valores das cargas, embora que, de um modo geral, nos dois traçados, as curvas equipotenciais obedeçam a mesma tendência.

Com base nesta figura, é possível calcular-se a diferença relativa entre os valores dos volumes de água armazenada para os dois modelos na mesma área. O resultado obtido para esta diferença que também pode ser chamada de erro relativo entre os dois modelos, fica em torno de 3,8 %.

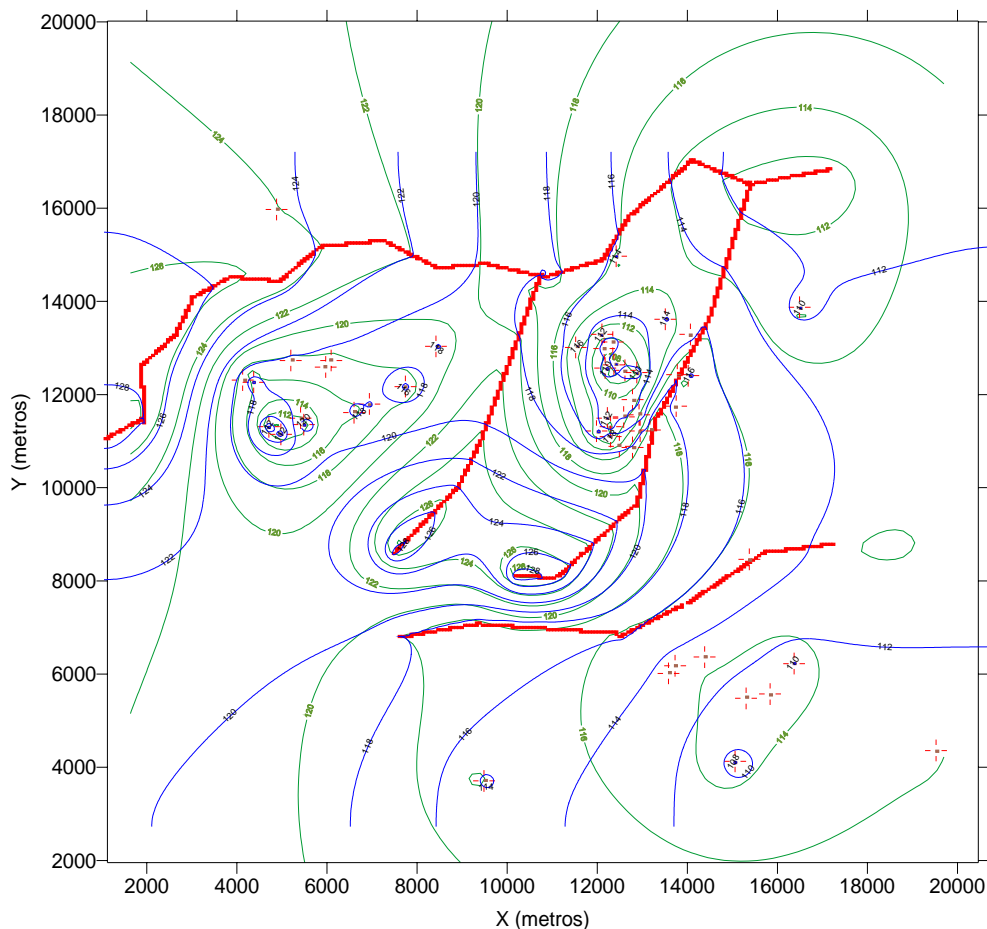


Figura 7. Sobreposição das linhas equipotenciais (metros) calculadas pelo SPLIT/VBB (cor verde) e pelo MODFLOW (cor azul) na área de interesse

CONCLUSÕES

Baseados em tudo que foi visto neste trabalho, conclui-se que o Método de Elementos Analíticos é uma importante alternativa para a modelagem matemática de fluxo hídrico subterrâneo para o melhor conhecimento e controle dos aquíferos regionais do Nordeste Brasileiro, pois ele supre a deficiência dos métodos numéricos com relação à modelagem de aquíferos de grandes dimensões ou regionais. Para a criação de uma metodologia de aplicação deste modelo foi preciso escolher uma região que permitisse de uma visão mais abrangente da situação real do conjunto de seus recursos hídricos como é o caso da Região da Bacia Sedimentar do Cariri que possui uma das maiores reservas aquíferas do Estado do Ceará e que vem apresentando problemas de exploração não controlada, desperdício e poluição dos recursos hídricos.

A aplicação dos programas SPLIT e VISUALBLUEBIRD e do programa MODFLOW na área de interesse localizada no Vale do Cariri, Ceará, forneceu resultados e muitas observações relativas a vários aspectos no campo da modelagem. A confiança da reprodução dos dados calculados pelo modelo analítico se baseia na execução do cálculo da diferença relativa entre os valores das cargas hidráulicas determinadas pelos dois modelos. A comparação do valor do volume total de água acumulado em função dos níveis das cargas calculadas por ambas simulações, resultou no valor da diferença máxima relativa de aproximadamente 3,8 %, o que pode ser interpretado como uma variação tolerada. A conclusão mais importante desta análise comparativa é que os modelos apresentaram resultados muito similares, podendo, então, o método analítico ser considerado confiável no que diz respeito à interpretação mais segura dos resultados obtidos.

Verificou-se, através das diversas simulações, que o método de elementos analíticos permite a variação da escala de detalhes, significando que ele pode ser aplicado tanto a uma abordagem regional como local, sem prejuízo da precisão dos resultados do modelo. Assim, quando o objetivo é a modelagem de aquíferos de grandes dimensões territoriais, existem restrições à aplicação de métodos numéricos porque estes necessitam da discretização do domínio para a sua operação. Para suprir esta deficiência dos modelos numéricos, o método de elementos analíticos aparece, como foi mostrado nas simulações, como fortemente indicado para domínios regionais. A aplicação regional, na área total dos três municípios, mostrou que o modelo de elementos analíticos pode servir como ferramenta para obtenção de dados iniciais ou de condições de contorno para o perímetro externo da área de interesse, ou seja, de uma modelagem mais detalhada do aquífero através de modelos mais complexos, o que fica a cargo, por exemplo, do programa MODFLOW.

REFERÊNCIAS

- ATLAS *dos recursos hídricos subterrâneos do Ceará*: Programa Recenseamento de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea no Estado do Ceará. Fortaleza: CPRM / Serviço Geológico do Brasil, 1999. 1 CD-ROM.
- CAVALCANTE, Itabaraci N.; TAJRA, A . A.; FRANGIPANI, A.; VERISSIMO, L. S. *As águas subterrâneas do Estado do Ceará*. Fortaleza: Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura – Brasil, 1998. Disponível em: < <http://www.iica.org.br> >. Acesso em: 05 jul. 2002.
- HAITJEMA, H. M. *Analytic element modeling of groundwater flow*. San Diego: Academic Press. 1995, 400 p. il.
- HAITJEMA, H. M. *Groundwater Flow Modeling*. In: LEHR, Jay. Standard handbook of environmental health, science, & technology. New York: McGraw-Hill, 2000, cap 8.2, p. 8.11-8.25.
- HUNT, R. J.; ZHENG, C. *Debating complexity in modeling*. EOS, Transactions, American Geophysical Union, Eletronic Supplement, v. 80, n. 3, p. 29, Jan. 1999. Disponível em: < <http://hydro.geo.ua.edu/Archive/EosSummary.htm> >. Acesso em: 02 jul. 2002.
- JANKOVIC', Igor. *SPLIT Manual - Version 2.3*. Department of Civil, Structural and Environmental Engineering. University at Buffalo, USA. 2001. Disponível em: < <http://www.groundwater.buffalo.edu> >. Acesso em: 05 jun. 2001.
- KELSON, V. A.; HUNT, R. J.; HAITJEMA, H. M. *Improving a regional model using reduced complexity and parameter estimation*. Ground Water, Amsterdam, v. 40, n. 1, p. 1-12, Jan./Feb. 2002.
- MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. *A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model*. Washington: Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geol. Survey. 1988. Book 6. Chap. A1.
- MENDONÇA, L. A. R. *Modelagem matemática, química e isotópica de uma bateria de poços na cidade de Juazeiro do Norte – Ceará*. 1996. 122 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- MONT'ALVERNE, A. A. F.; PONTE, F. C.; DANTAS, J. R. A.; LOPES, C. F.; MELO JÚNIOR, A. H.; PONTE, J. S. A.; FILGUEIRA, J. B. M.; SOUZA, S do R.; SILVA, E. C. C. da. *Projeto avaliação hidrogeológica da bacia sedimentar do Araripe*. Fase I. Recife: DNPM, 1996. 101 p. il.

- SANTIAGO M. F.; MENDES FILHO, J.; SILVA, C. M. V. S.; FRISCHKORN, H. *Modelo isotópico da dinâmica dos aquíferos do Cariri*. In: Projeto de Avaliação Hidrogeológica da Bacia Sedimentar do Araripe. Fase I. Recife: DNPM, 1996. p. 89-101. Apêndice.
- STRACK, Otto D. L. *Groundwater mechanics*. New Jersey: Prentice-Hall, 1989, 732 p.
- STRACK, Otto D. L. *Principles of analytic element method*. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 226, p. 128-138, 1999.
- VERÍSSIMO, L. S. *A importância das águas subterrâneas para o desenvolvimento socioeconômico do eixo CRAJUBAR, Cariri Ocidental – Estado do Ceará*. 1999. 140 f. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia) - Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.