

Método de Elementos Analíticos Aplicado no Aquífero da Região do Cariri - Ceará

Carisia Carvalho Gomes e Marco Aurélio Holanda de Castro

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará

carisia@ufc.br e marco@ufc.br

Recebido: 28/01/04 revisado: 04/11/04 ac eito: 19/03/05

RESUMO

O objetivo deste trabalho é mostrar a utilização do Método de Elementos Analíticos para a modelagem matemática de fluxo hídrico subterrâneo em aquíferos regionais. A área escolhida para esta aplicação é a região inserida no Vale do Cariri, localizada no sul do Estado do Ceará e 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 e porque o abastecimento público de água das cidades citadas é feito quase que totalmente com água de origem subterrânea. Este último fato induz a problemas relativos a intensa exploração do aquífero associados com outros agravantes como o desperdício de água e a poluição ambiental. Questões relacionadas ao grau de confiança, susceptibilidade, adequação e precisão do modelo analítico são respondidas através da análise dos resultados do uso simultâneo, na região, do Método de Elementos Analíticos, através do programa Split/VisualBlueBird e do Método de Diferenças Finitas, através do programa Modflow que, apesar de apresentar algumas limitações, serve de referência por ser um método de reconhecida aceitação científica.

Palavras-Chave: Método Elementos Analíticos; modelagem matemática; Ceará; Método Diferenças Finitas.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de técnicas de exploração dos recursos naturais de água subterrânea e a manutenção de sua qualidade vêm 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, disposição inadequada de lixo, atividades agrícolas, etc. Esta preocupação atinge, em especial, a população da região semi-árida do Nordeste Brasileiro que, além do problema 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 consequência, as populações ficam submetidas a racionamento de água, falta de alimentos, emigração da população afetada para os centros urbanos e, ainda 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 Estadu-

ais, entre outras medidas emergenciais, durante os períodos de seca, costumam promover programas de perfuração de poços na tentativa de aumentar a oferta de água. Devido a estes programas, existe uma significativa quantidade de poços profundos explorando os aquíferos (Cavalcante et al, 2002). 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 natural ou artificial e modelos de otimização. Existem vários tipos de modelos disponíveis para simulação do comportamento dos aquíferos, mas os mais utilizados são os matemáticos (Hunt & Zheng, 1999). Este trabalho aplica o Método de Elementos Analíticos proposto por Strack (1989 e 1999) em um estudo de caso no Estado do Ceará.

MATERIAL E MÉTODOS

O Método de Elementos Analíticos tem como princípio a superposição de funções analíticas para resolver problemas complexos de fluxo, simu-

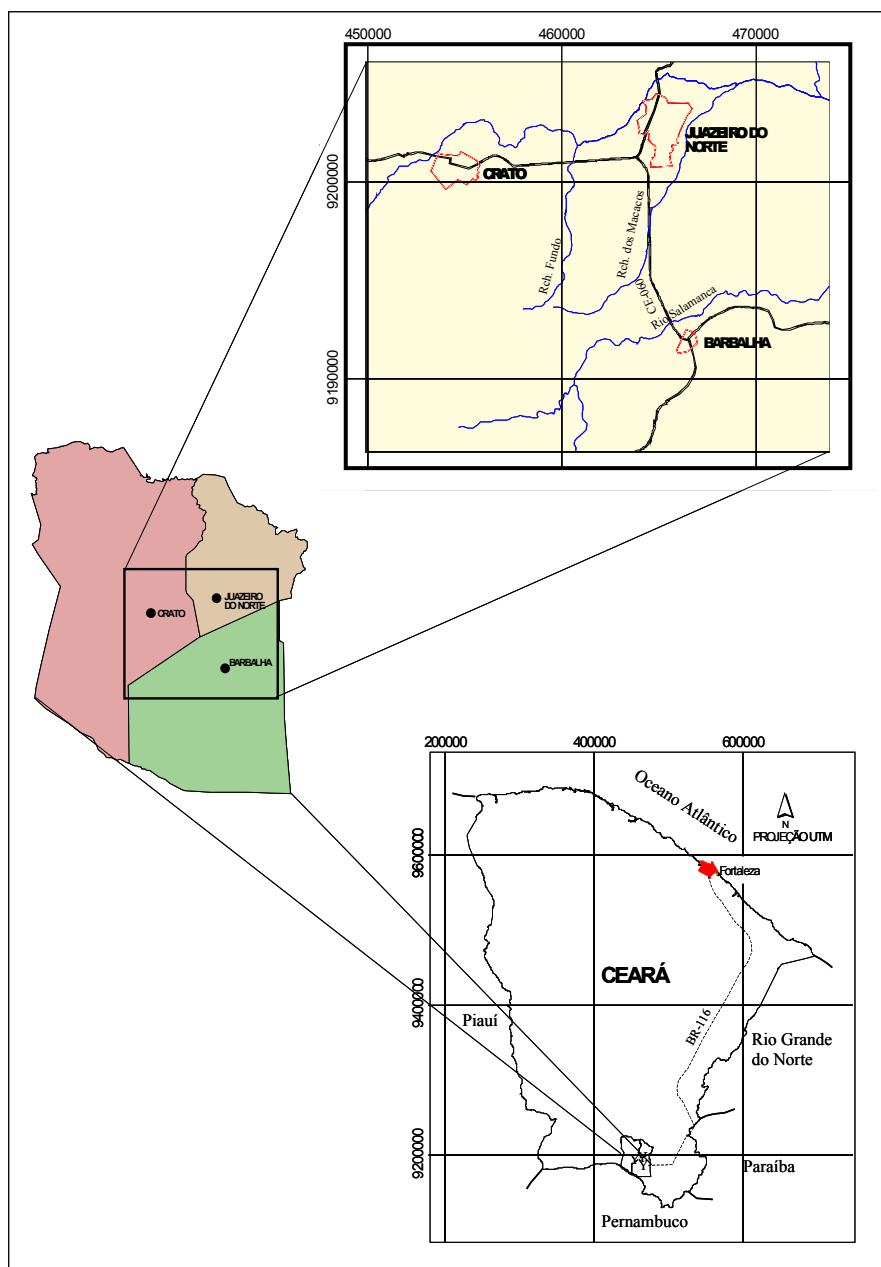


Figura 1. Localização das áreas de estudo: área total (lado esquerdo) e área de interesse (acima) (Sem escala e coordenadas no Sistema UTM)

lando os efeitos causados por cada componente ou característica hidrogeológica do aquífero regional no fluxo da água subterrânea. A solução analítica composta é uma combinação de numerosas soluções analíticas elementares: os elementos analíticos para o fluxo regional (rios, lagos, poços, fluxo uniforme, etc) e satisfaz a equação diferencial que governa o

fluxo em qualquer ponto do domínio, tendo como consequência a garantia da continuidade do fluxo. As cargas hidráulicas e as velocidades do fluxo da água subterrânea são definidas em qualquer ponto no domínio do escoamento; desta maneira, não há dispersão numérica resultante da imprecisão do cálculo das velocidades do fluxo (Haitjema,1995).

Neste estudo o método analítico é aplicado em dois tipos de áreas: na área total (regional) e a uma parte desta região, chamada de área de interesse, ambas definidas na Figura 1. A área total compreende os 03 municípios e a área de interesse é o Vale do Cariri que fica dentro desta região e é a zona onde ocorre a maior concentração de poços, ou seja, intensa exploração do aquífero. O modelo numérico de Diferenças Finitas é aplicado apenas na área de interesse. A aplicação simultânea dos dois modelos na área de interesse é feita para atender objetivos da análise comparativa.

Existem algumas razões que levam a escolha desta área, a primeira e mais importante deve-se ao fato dela ser constituída de rochas sedimentares, representadas por arenitos, siltitos, argilitos e calcários, com predominância dos 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 segunda razão é baseada em resultados de estudos anteriores realizados por Mendonça (1996) e por Santiago et al. (1996).

Mendonça (1996) 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 localizado em zonas de alto risco de poluição ambiental. Santiago (1996) utilizou medidas isotópicas, de carbono 14, nas águas subterrâneas da região para concluir que as águas bombeadas por alguns poços são misturas de paleo-águas (entre 08 e 12 mil anos de idade) com águas pluviais recentes infiltradas diretamente no Vale. 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 os programas Split (Jankovic', 2001) na versão 2.3, 2001 e o VisualBlueBird, versão 28/08/2002, (Jankovic', 2001 e CRAIG, 2002) e para o modelo numérico o programa Visual Modflow para Windows, versão 2.7 (McDonald & Harbaugh, 1988).

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região fica localizada a 538 km de Fortaleza, como mostra a Figura 1. A área total possui 1.788,4 km², sendo Crato com 1.117,5 km², Juazeiro do Norte com 219 km² e Barbalha 451,9 km². A área de interesse é constituída por parte desta área, sendo 170 km² de Crato, 102 km² de Juazeiro do Norte e 158 km² de Barbalha, perfazendo uma área de 430 km².

Aspectos geológicos

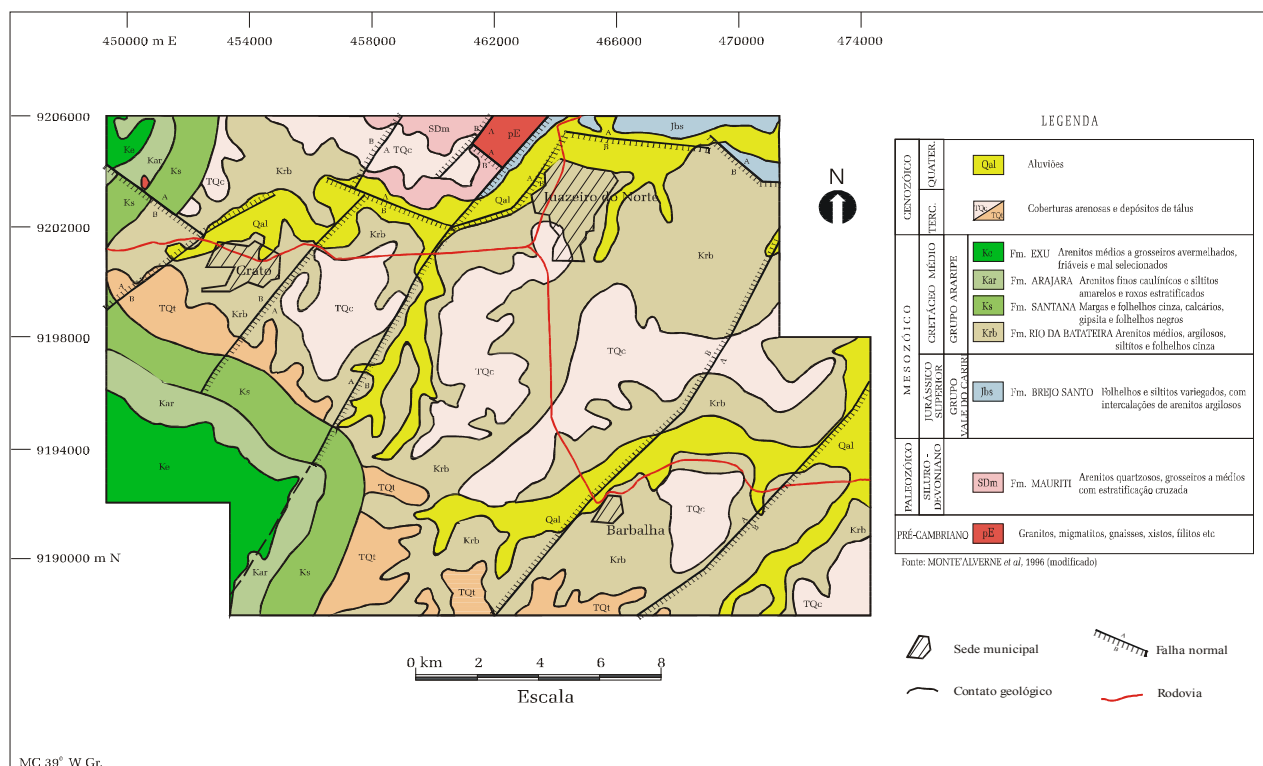
A formação geológica da área de interesse (Figura 2) é composta por rochas sedimentares, datando desde o Siluro-Devoniano até o Cretáceo e uma pequena parte de rochas pré-Cambrianas. A Formação Rio da Batateira ocorre por todo o Vale do Cariri, ocupando 70% da área (301 km²) e onde está perfurada a maioria dos poços selecionados. 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.

Aspectos climáticos

Existe na região uma distribuição de ocorrência de vários tipos de clima, compreendendo 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.

Aspectos hidrológicos

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 de 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.



Fonte: VERÍSSIMO (1999)

Figura 2. Mapa geológico da área de interesse.

Esta drenagem é parcialmente alimentada pelas fontes perenes da borda da Chapada do Araripe que contribuem para a formação dos rios oriundos delas. Os principais açudes são: Manuel Balbino (Juazeiro do Norte) com capacidade de 37.180.000 m³, barrando o Riacho dos Carneiros e Thomás Osterne (Crato) com capacidade de 28.780.000 m³, que barra o Rio Carás.

Aspectos hidrogeológicos

Tabela 1. Parâmetros hidrogeológicos do aquífero

Transmissividade (aquífero confinado)	7,9 x 10 ⁻³ m ² /s
Condutividade hidráulica	7,32 x 10 ⁻⁵ m/s
Coefficiente de Armazenamento	1,36 x 10 ⁻³
Porosidade efetiva	20 %

A formação geológica do Vale do Cariri 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 localizados nas vertentes da Chapada do Araripe e com vazão média de 18 m³/h.

Os valores médios dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero (sistema aquífero médio, definido na Figura 3), segundo o DNPM (Mont'Alverne et al., 1996) estão na Tabela 1.

Tabela 2. Reservas, disponibilidades e potencialidade dos sistemas aquíferos

Reserva permanente	5,31 x 10 ⁹ m ³
Reserva reguladora	260.500 m ³ /dia
Disponibilidade efetiva	263.800 m ³ /dia
Disponibilidade atual	140.000 m ³ /dia
Potencialidade	290.000 m ³ /dia

Os valores correspondentes à reserva, disponibilidades e potencialidade dos sistemas aquíferos da área de interesse, segundo o DNPM, estão na Tabela 2

Poços

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.

A totalidade dos poços da unidade hidroestratigráfica 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 em Crato (CPRM, 1999)

A taxa média de consumo “per capita” na região é aproximadamente 340 l/hab./dia.

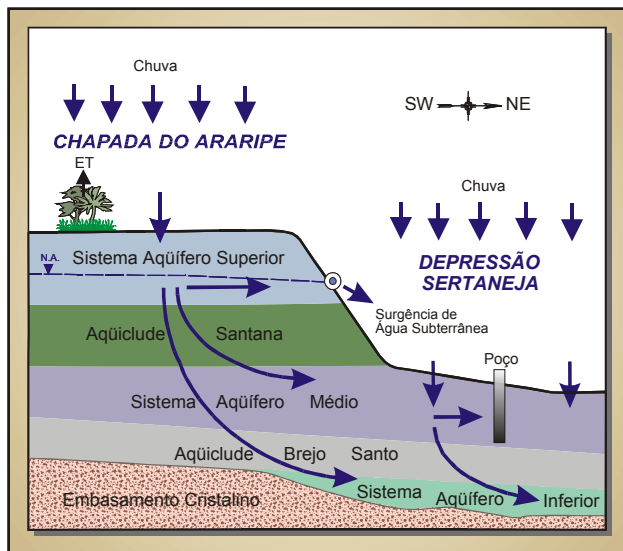


Figura 3. Distribuição esquemática dos sistemas aquíferos da região do Cariri (MONT'ALVERNE et al., 1996)

MODELAGEM

A modelagem da área total (Figura 4), compreendendo os três municípios, 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 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 6. Este mapa contém as curvas de nível, a localização das sedes dos municípios, a localização dos 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.

Dados de entrada

As propriedades do aquífero são as mesmas tanto para a modelagem em escala regional como local. A Tabela 3 apresenta os parâmetros geométricos e hidrogeológicos médios característicos que são utilizados como entrada de dados para os modelos.

Tabela 3. Dados de entrada do modelo

Cota da base do aquífero (referência de nível)	0 m
Espessura do aquífero (saturada)	110 m
Condutividade hidráulica regional	7.32 x 10 ⁻⁵ m/s ou 0,264 m/h
Porosidade efetiva	0,2

Os pontos de cargas observadas são pontos com cargas hidráulicas médias e são escolhidos em locais estratégicos no domínio do fluxo subterrâneo. São utilizadas séries de elementos analíticos distintos para cada tipo de modelagem. Para a área de interesse os elementos analíticos utilizados são os seguintes:

Na primeira simulação: 50 poços com taxas de bombeamento conhecidas; 02 rios e 02 riachos com os gradientes, conforme Tabela 4:

Tabela 4. Gradientes hidráulicos

Curso d'água	Gradientes (m/m)
Rio da Batateira	0,00122
Rio Salamanca	0,00038
Riacho Fundo	0,00358
Riacho dos Macacos	0,00358

Na segunda simulação: os elementos são os mesmos utilizados na primeira. A única diferença é quanto ao número de poços que aumenta para 166 poços.

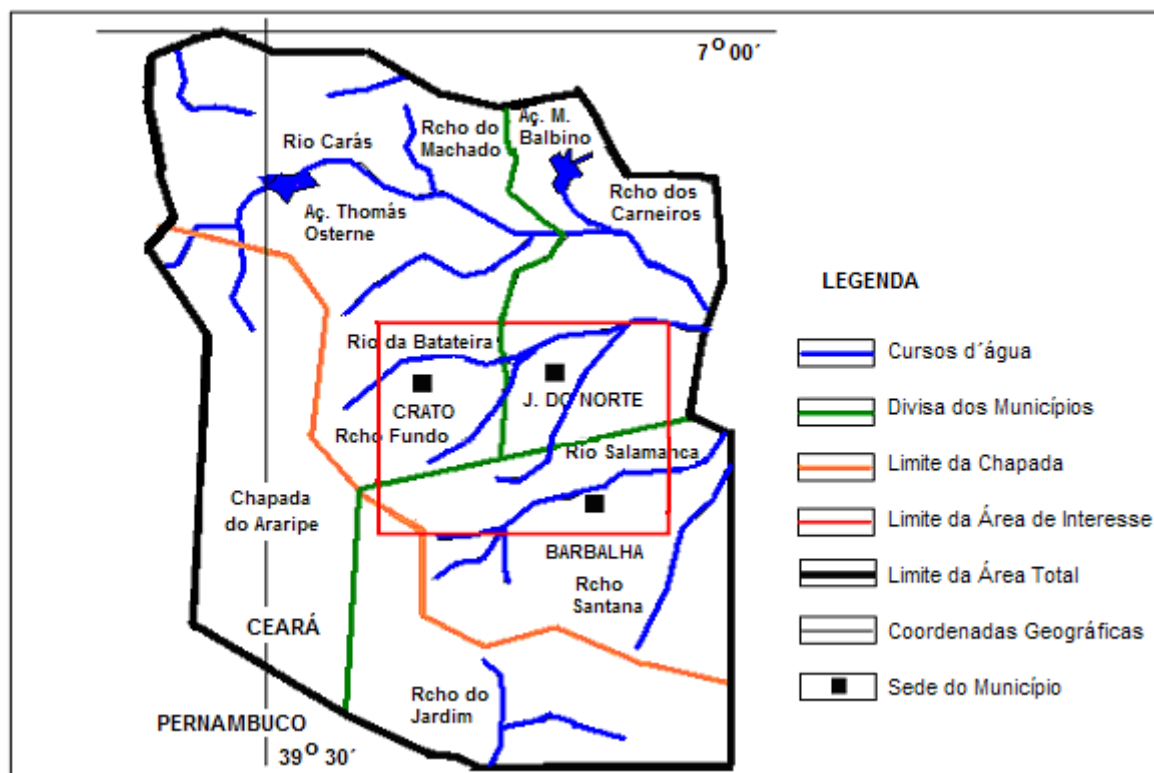


Figura 4. Croquis da Região do Cariri: Municípios de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha, mostrando a área de interesse.

Para a área total: além dos 50 poços, são considerados os lagos formados pelos Açudes Thomás Osterne e Manuel Balbino e as 44 fontes naturais, com vazões superiores a $5 \text{ m}^3/\text{h}$. Os rios e riachos são em número de 19 e, devido a sua formação geológica, supõe-se estarem em contato direto com o nível freático, alimentando a reserva subterrânea de água.

O elemento área de recarga é considerado apenas para as simulações na área de interesse que possui área igual a $25.600 \text{ m} \times 16.800 \text{ m}$. 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, segundo Mont'Alverne et al. (1996), devido à precipitação na região é igual a $109,74 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ ou $1,66 \text{ l/s/km}^2$.

Considerando-se a contribuição dos exutórios naturais do Sistema Aquífero Superior (Formação Exu/Arajara), que escoam superficialmente sobre os sedimentos do pediplano, este valor pode ser avaliado aproximadamente em $2,32 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. Somando-se as duas contribuições chega-se a recarga total de $112,06 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. A recarga total

distribuída em toda a área resulta na taxa de $0,0000297 \text{ m/h}$.

A seleção dos poços, para a modelagem da área total e para a primeira na área de interesse, reduz o número de 548 poços para 50 unidades, obedecendo aos seguintes critérios: são descartados os poços que estão fora de uso, não instalados, sem dados suficientes ou abandonados; a seguir, são selecionados apenas os poços públicos que são utilizados, efetivamente, para abastecimento público e, finalmente, são escolhidos aqueles que têm vazões de bombeamento maiores que $12 \text{ m}^3/\text{h}$. Para a segunda modelagem na área de interesse, o número de poços aumenta para 166, incluindo-se, todos poços em uso, privados para irrigação e para usos múltiplos, com vazão de bombeamento maior que $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

A modelagem, utilizando o programa Modflow, é realizada apenas para a área de interesse com 50 poços e os dados de entrada utilizados para o método numérico são os mesmos para o analítico. As diferenças que merecem ser destacadas são que os rios (2) e os riachos (2) entram como condição de contorno do tipo carga constante especificada

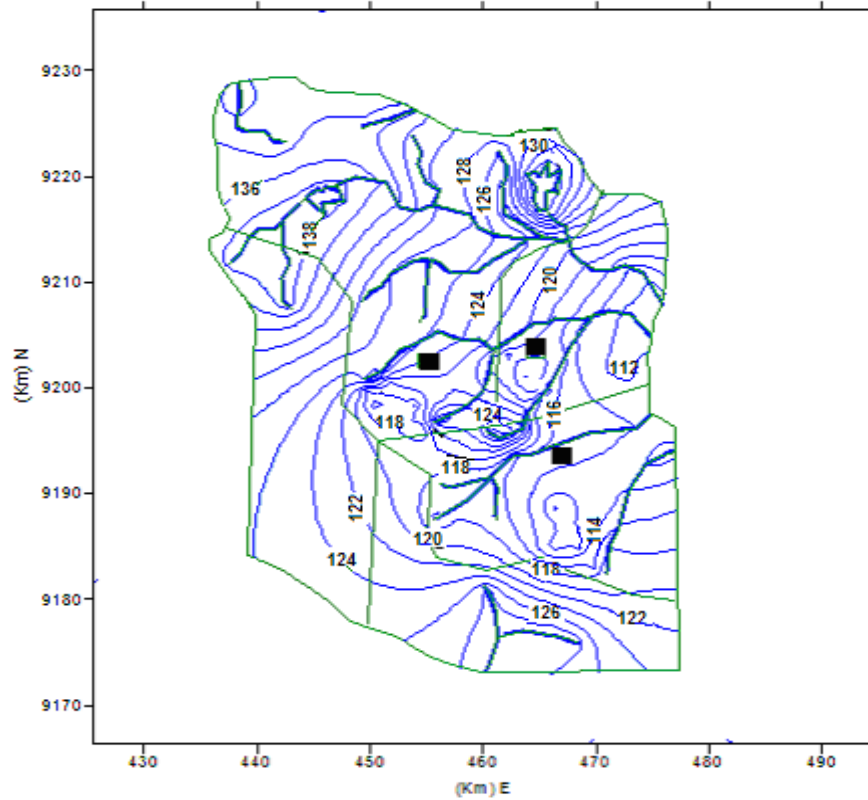


Figura 5. Curvas equipotenciais, de 2 em 2 metros, para a Região do Cariri (área total) - (SPLIT/VBB).

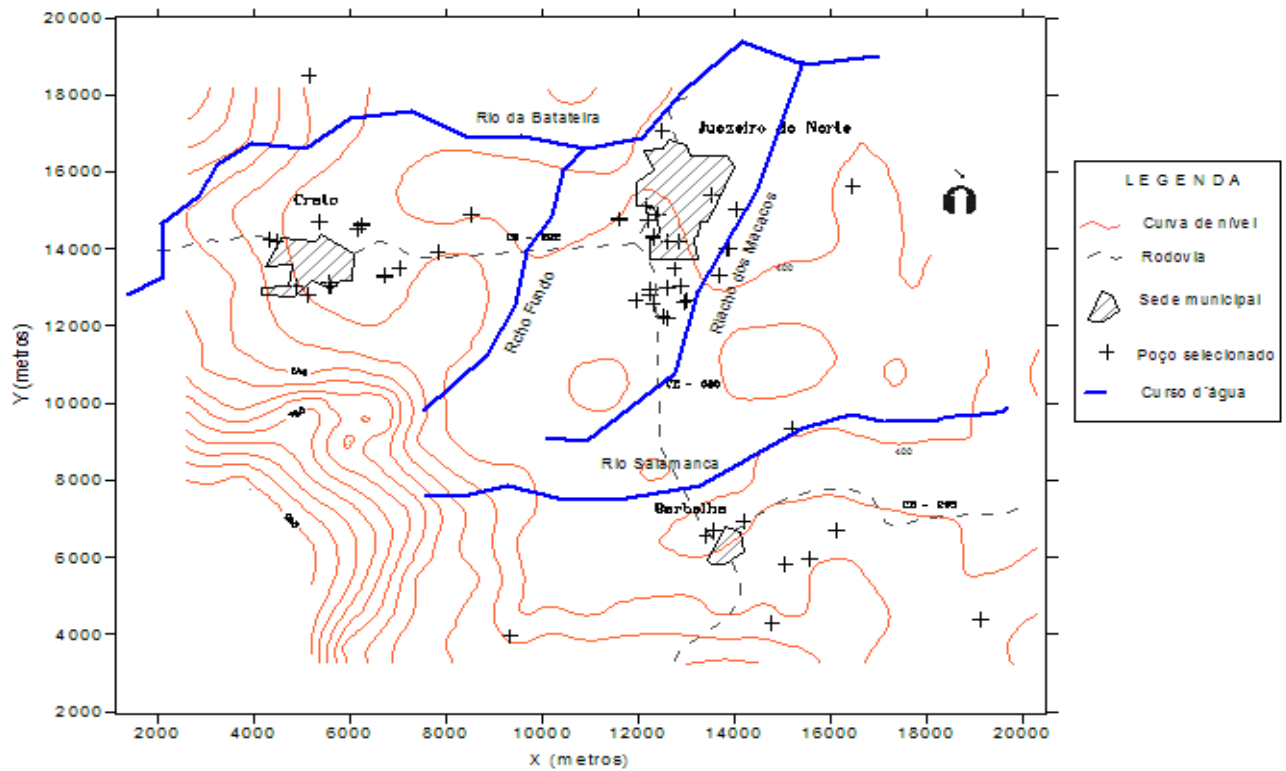


Figura 6. Mapa base para modelagem, correspondente à área de interesse.

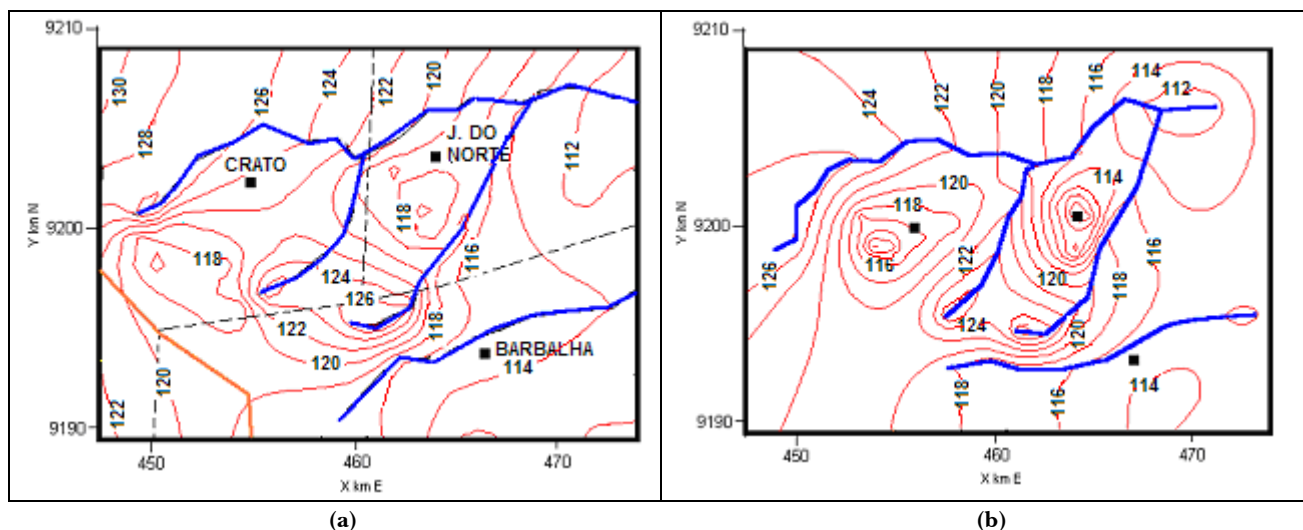


Figura 7. Cargas hidráulicas (metros) na área de interesse resultante da simulação com o SPLIT/VBB aplicando com dimensões iguais a área total (a) e restrita à área de interesse (b).

em todos os seus percursos e que a discretização do domínio possui uma malha de 300 x 300 unidades, ficando o tamanho da célula aproximadamente igual a 85 x 56 metros (área = 4.760 m²).

RESULTADOS

A Figura 4 apresenta um esboço (sem escala) da Região do Cariri, compreendendo a área total dos três municípios com seus respectivos componentes hidrológicos mais importantes. Nesta figura consta também a delimitação do perímetro (retângulo interno) da área definida como de interesse. As curvas equipotenciais, calculadas pelo modelo analítico na área total, estão traçadas na Figura 5, onde é possível ter-se uma visão macro da distribuição regional das cargas hidráulicas do aquífero.

A Figura 6 apresenta o mapa da área de interesse, utilizada como base para a modelagem, chamado de mapa base, com escala em metros, e utilizada para o estudo comparativo com o método numérico. As Figuras 7 (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, enquanto que, para a aplicação local, apenas um ponto de referência, de carga especificada e fora da área de interesse, é conside-

rado. Nota-se que a diferença maior entre as curvas se destaca nos contornos da área de interesse.

A Figura 8 mostra uma comparação entre 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.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados da modelagem

Número de Poços	Carga hidráulica mínima (m)	Vazão total de bombeamento (m ³ /h)	Consumos anuais (m ³)
50	104	4.679	41 x 10 ⁶
166	88	8.210	72 x 10 ⁶

O rebaixamento médio aproximado é de 16 metros e os valores dos consumos representam 40 % e 64 %, respectivamente, da recarga total do aquífero (sistema aquífero médio) que, em períodos que ocorrem precipitações fica em torno de 112 x 10⁶ m³/ano.

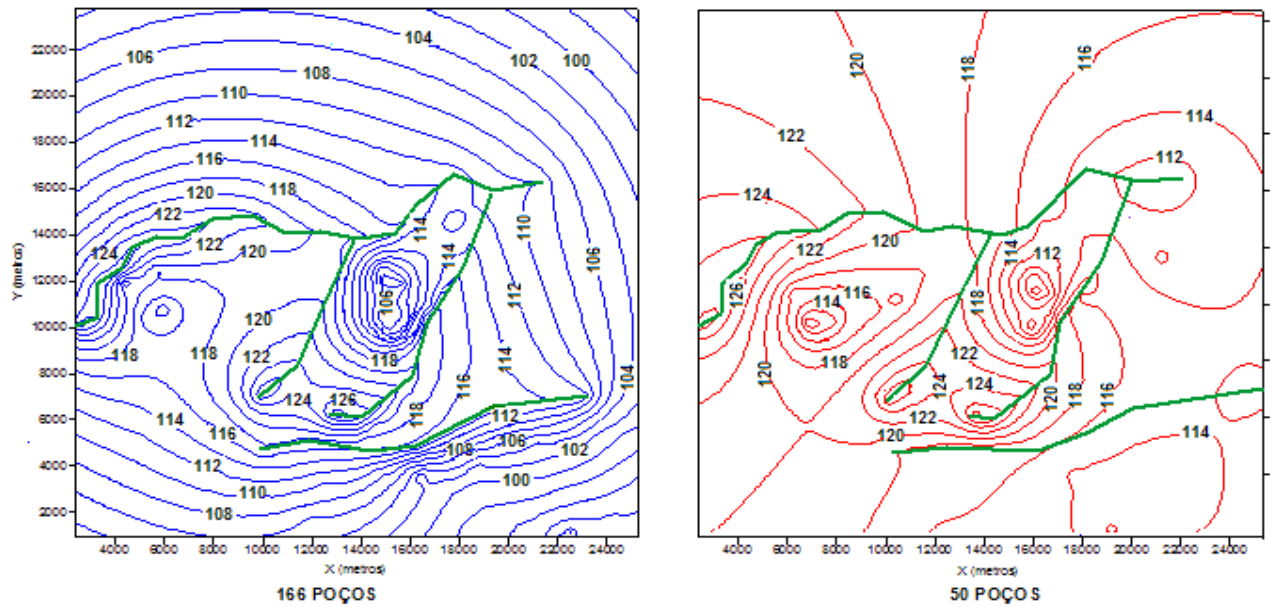


Figura 8. Comparação entre a distribuição das linhas equipotenciais (metros) para o Vale do Cariri com 166 poços (esquerda) e 50 poços (direita).

Diante da não disponibilidade dos dados de condutância 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 9 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.

Tabela 6. Diferença entre modelos

	Modelo Numérico (m)	Modelo Analítico (m)	Diferença entre modelos (m)
Valor máximo da equipotencial	130	129,1586	0,8414
Valor mínimo da equipotencial	105	104,7554	0,24446

Neste gráfico pode ser notada a diferença, segundo a Tabela 6, entre os valores máximos e mínimos das equipotenciais nos dois modelos, embora que, de um modo geral, nos dois traçados, as curvas equipotenciais obedecem à mesma tendência.

Com base nesta Figura, ou seja, através do traçado das equipotenciais, é possível calcular-se a diferença entre os valores dos volumes de água armazenada para os dois modelos na mesma área. O modelo que apresentou maior resultado foi o numérico, ficando a diferença entre os dois modelos, em torno de 3,8 %.

CONCLUSÕES

Baseados em tudo que foi visto, pode-se concluir 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, pois ele supre a deficiência dos métodos numéricos com relação à modelagem de aquíferos de grandes dimensões.

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 e que vem apresentando problemas de exploração não controlada, desperdício e poluição dos recursos hídricos.

A aplicação dos programas Split e Visual-BlueBird e do Modflow na área de interesse forneceu resultados e muitas observações relativas a vários aspectos no campo da modelagem.

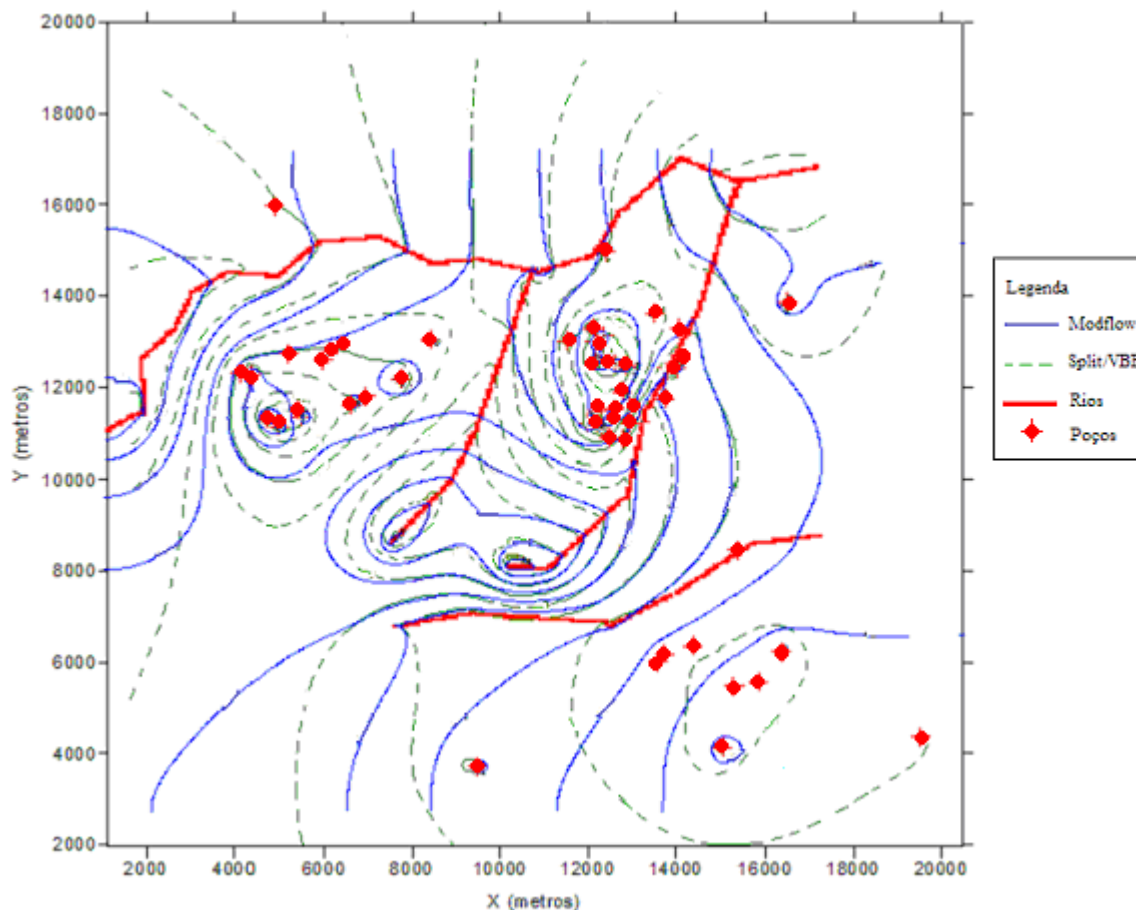


Figura 9. Sobreposição das linhas equipotenciais (metros) calculadas pelo Split/VBB e pelo Modflow na área de interesse.

A indicação de confiança na reprodução dos dados calculados pelo modelo analítico se baseia na execução do cálculo da diferença relativa, de aproximadamente 3,8 %, entre os valores do volume total de água acumulado em função dos níveis das cargas hidráulicas determinadas pelos dois modelos. Esta diferença pode ser interpretada como uma variação tolerada, tendo em vista que os modelos apresentaram resultados muito similares e que o modelo numérico (Modflow) é um dos mais utilizados por hidrogeólogos na modelagem de água subterrânea.

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 áreas 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 (KELSON et al,2002).

REFERÊNCIAS

- 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.
- CPRM (Centro de Pesquisas em Recursos Minerais). *Atlas dos recursos hídricos subterrâneos do Ceará: Programa Recenseamento de Fontes de Abasteci-*

- mento por Água Subterrânea no Estado do Ceará. Fortaleza, 1999. 1 CD-ROM.
- CRAIG, J. VBB Manual. Depart. of Civil, Structural and Environmental Engineering. University at Buffalo, USA. Disponível em: <http://www.groundwaer.buffalo.edu >. Acesso em: 20 Nov. 2002.
- HAITJEMA, H. M. *Analytic element modeling of groundwater flow*. San Diego: Academic Press. 1995, 400 p. il.
- HUNT, R. J.; ZHENG, C. *Debating complexity in modeling*. EOS, Transactions, American Geophysical Union, Electronic 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 ground-water 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.
- _____. *Principles of analytic element method*. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 226, p. 128-138.
- 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 Hidrogeo-

logia) - Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Analytical Element Method applied to the aquifer of the Cariri region - Ceará

ABSTRACT

The main objective of this work is to apply a methodology for the use of the Analytic Element Method for mathematical modeling of groundwater flow in regional aquifers. An area of real interest was chosen in the region of Cariri Valley, located in the south of Ceará State and comprising the townships of Crato, Juazeiro do Norte and Barbalha. This area was selected because the region has one of the largest groundwater resources in sedimentary rock of the State and because public water supply of the townships mentioned is almost entirely from groundwater. The latter reason has resulted in severe problems of groundwater exploitation and environmental pollution. Questions related to the degree of reliability, suitability, adequacy and accuracy of the model in the region are addressed by means of simultaneous comparisons of the Analytic Element Method (using the Split/ VisualBlue-Bird program) and the Finite Difference Method (using the Modflow program) which, despite some limitations, has been given scientific approval.

Keywords: Analytical Element Method; groundwater modeling; Ceará; Finite Difference Method.