

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EM AQUÍFEROS LIVRES – ESTUDO DE CASO

Germana Cavalcante Menescal¹ & Marco Aurélio Holanda de Castro²

Resumo - No passado, a principal força motriz para os estudos hidrogeológicos era a necessidade de avaliar o potencial de abastecimento de água dos aquíferos. Durante os últimos anos, essa ênfase foi ampliada para problemas de abastecimento de água e sua qualidade. Isto gerou a necessidade de prever o movimento de contaminantes através do ambiente sub-superficial. Os modelos numéricos de transporte de contaminantes são fundamentais para o entendimento da extensão da contaminação e para predição de cenários. O estudo de caso foi desenvolvido em um sistema aquífero inserido no Perímetro Irrigado de Morada Nova-Ce. O objetivo deste trabalho foi promover a simulação do transporte de contaminantes na água subterrânea desse sistema, utilizando a modelagem computacional. Quatro cenários diferentes foram simulados, visando caracterizar o caminhamento de contaminantes durante dois períodos distintos (um chuvoso e outro seco), com simulações para regime permanente e transiente, utilizando os modelos computacionais MODFLOW e MODPATH. Os resultados obtidos mostraram que é imperioso o monitoramento constante da qualidade da água retirada dos poços de bombeamento juntamente com o controle mais efetivo do tipo de defensivos agrícolas, já que foi evidenciado o alto risco de contaminação desses poços através do transporte do contaminante veiculado pela água subterrânea.

Abstract - In the past, the main driving force for hydrogeologic studies has been the need to assess the water-supply potential of aquifers. During the past 20 years, however, the emphasis has increased to water-supply and water-quality problems. This has driven a need to predict the movement of contaminants through the subsurface environment. Numerical models applied to mass transfer are very important to predict contamination scenarios. The present work is based on a study of an aquifer located in the irrigation project of Morada Nova-Ce, Brazil. The objective of this work is to simulate the movement of contaminant mixed in the groundwater. Four scenarios were simulated considering the rainy and dry seasons and the permanent and transient conditions using

¹ Doutoranda; Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental; Universidade Federal do Ceará; Campus do Pici, Bloco 713; CEP: 60.451-970; Fortaleza-Ceará; Fone/Fax: (85) 288.9589; germana@deha.ufc.br.

² Professor Adjunto; Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental; Universidade Federal do Ceará; Campus do Pici, Bloco 713; CEP: 60.451-970; Fortaleza – Ceará; Fone/Fax: 288.9589; marco@ufc.br.

the computer codes MODFLOW and MODPATH. The results indicated that it is very important the knowledge of the quality of the water pumped from the various wells installed in the aquifer. The results also indicated that it is mandatory a severe control over the pesticides and fertilizers since they showed a high risk of contamination of the wells through contaminant transport.

Palavras-Chave - transporte de contaminantes; água subterrânea; simulação computacional.

INTRODUÇÃO

No passado, a principal força motriz para os estudos hidrogeológicos era a necessidade de avaliar o potencial de abastecimento de água dos aquíferos. Durante os últimos 20 anos, essa ênfase foi ampliada de problemas de abastecimento de água para problemas de abastecimento de água e sua qualidade. Isto gerou a necessidade de prever o movimento de contaminantes através do ambiente sub-superficial.

Os últimos 20 anos, aproximadamente, também nos mostraram algumas das principais descobertas tecnológicas na hidrologia das águas subterrâneas. Uma área tecnológica crescente tem sido o desenvolvimento e uso de modelos computacionais de simulação para análise de fluxo e transporte de soluto nos sistemas de água subterrânea.

Os sistemas aquíferos são muito menos vulneráveis à contaminação do que as águas superficiais. Apesar disso, a contaminação das águas subterrâneas é um evento muito mais preocupante do que a contaminação das águas superficiais, visto que estas se renovam rapidamente, recuperando-se após cessar a fonte de contaminação. No caso das águas subterrâneas, a recuperação da qualidade vai depender do tipo de contaminante e pode ser tão demorada que muitas vezes se torna inviável, dando-se o aquífero como perdido.

Neste contexto, o estudo das causas e conseqüências da contaminação das águas subterrâneas se constitui em ferramenta de valor imprescindível na previsão de cenários, para gerir de forma sustentável as atividades contaminantes do meio ambiente. Os modelos numéricos de fluxo e transporte de contaminantes são fundamentais para o entendimento da extensão da contaminação e para predição desses cenários. A combinação da utilização dos dados de campo com a modelagem matemática levam a excelentes resultados na previsão do caminhamento do contaminante na água subterrânea, permitindo assim um planejamento racional do aproveitamento dos recursos hídricos em questão.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi promover a simulação do comportamento do transporte de contaminantes na água subterrânea de um sistema aquífero localizado na cidade de Morada Nova-CE, utilizando a modelagem computacional.

METODOLOGIA

Descrição da área de estudo

Localizado no Nordeste brasileiro, no leste do Estado do Ceará, o Município de Morada Nova pertence à mesorregião do Jaguaribe, inserida na microrregião do Baixo Jaguaribe, fazendo parte da 10ª. Região Administrativa do Estado do Ceará. O Município possui 2.796,6 km², sendo o sexto maior em área territorial no Estado de Ceará. As coordenadas geográficas da sede são 05°06'24" de Latitude Sul, 38°22'21" de Longitude Oeste, estando a 89 metros de Altitude.

A área de estudo (Figura 1) está inserida no Perímetro Irrigado de Morada Nova, às margens do rio Banabuiú, numa das regiões onde a atividade agrícola predomina, principalmente, a de cultura irrigada. A área onde está localizado o aquífero possui 13,5 km², sendo limitada pelas seguintes coordenadas UTM: 9.434.500 (N), 568.500 (E); 9.434.500 (N), 573.500 (E); 9.431.500 (N), 573.500 (E); e 9.431.500 (N), 568.500 (E).

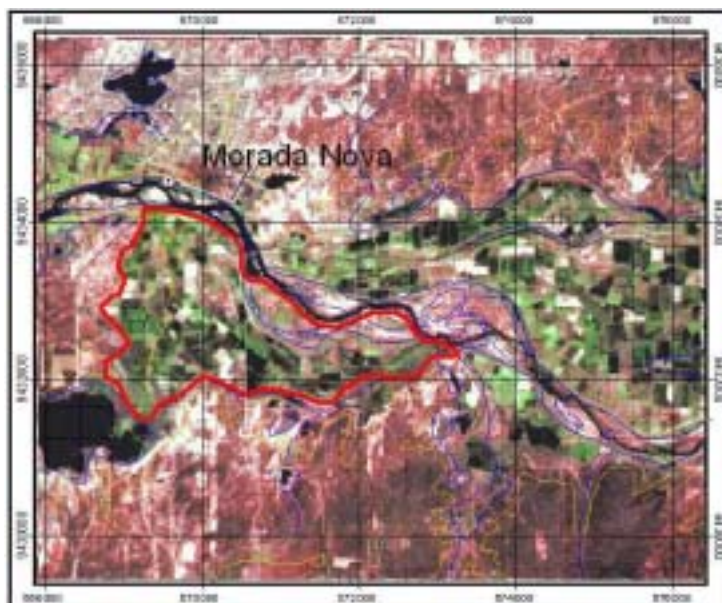


Figura 1 – Área de estudo. Fonte: COGERH, 2003

O clima da região onde está localizado o perímetro irrigado é do tipo BS W'h', muito quente e semi-árido, de acordo com a classificação de Köppen e tropical quente, de seca acentuada, de acordo com Gaussen. Geralmente, a estação chuvosa tem início em janeiro, indo até junho, concentrando cerca de 75% das precipitações nos meses de março, abril e maio. A média anual situa-se em torno de 742 mm, sendo que essa distribuição das chuvas, através dos anos, tem-se mostrado muito irregular, o que acarreta desvios acentuados em torno da média.

A vegetação predominante no Município de Morada Nova é a Caatinga arbustiva densa. Devido ao tipo de solo, a vegetação específica encontrada na área de estudo é classificada como Floresta Mista Dicotillo-Palmácea (mata ciliar com carnaúba e dicotiledôneas) (IPLANCE, 2000).

Os solos aluvionais do Perímetro Irrigado Morada Nova, em razão de sua textura diversificada, permitem a exploração de uma extensa gama de culturas (DNOCS, 2003). O perfil estratigráfico do aquífero, verificado através da perfuração de poços na área, apresenta duas camadas distintas de solo: uma superior, formada por material argiloso; e uma inferior, mais espessa, constituída de areia.

Geologicamente, a área estudada insere-se no contexto das formações recentes (Holoceno) de origem fluvial, que são as planícies aluviais, provindas das deposições trazidas pelo rio Banabuiú, com o qual faz fronteira nas porções Norte e Nordeste, sendo circundada por rochas do embasamento cristalino ao longo do resto de sua extensão.

Na sub-bacia do rio Banabuiú ocorrem dois tipos de sistemas aquíferos classificados como cristalino e sedimentar. Cerca de 80% da área da bacia encontra-se no domínio das rochas cristalinas. O sistema cristalino trata-se genericamente de um sistema aquífero de fraca potencialidade, construído por um meio fraturado, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico, com zonas fendilhadas limitadas. Sua litologia abrange uma extensa variedade de rochas. Geralmente os aquíferos aluvionares são do tipo livre, com elevada capacidade de armazenamento, alta permeabilidade e apresentam águas de boa qualidade. Litologicamente, os aluviões geralmente são compostos de areias com granulação variando de fina a grosseira, seixos, calhaus, siltes, argilas e matéria orgânica. Todo esse material é inconsolidado. Sob o enfoque hidrogeológico, a área mais favorável à exploração de água é aquela do baixo curso, onde a espessura é maior, oscilando em torno de 25 m. As vazões de produção desses poços, nessa área, em regime contínuo de bombeamento, são da ordem de 50 m³/h.

Geometria do sistema aquífero

O sistema aquífero aluvionar em estudo é do tipo livre, estando localizado à margem direita do rio Banabuiú, à jusante do município de Morada Nova. A sua geometria perfaz uma área superficial 4,45 km², com profundidades que variam de 6 a 17 metros. A figura 2 apresenta o

contorno do aquífero, onde as áreas hachuradas em verde escuro representam as formações cristalinas, que chegam a aflorar no terreno.

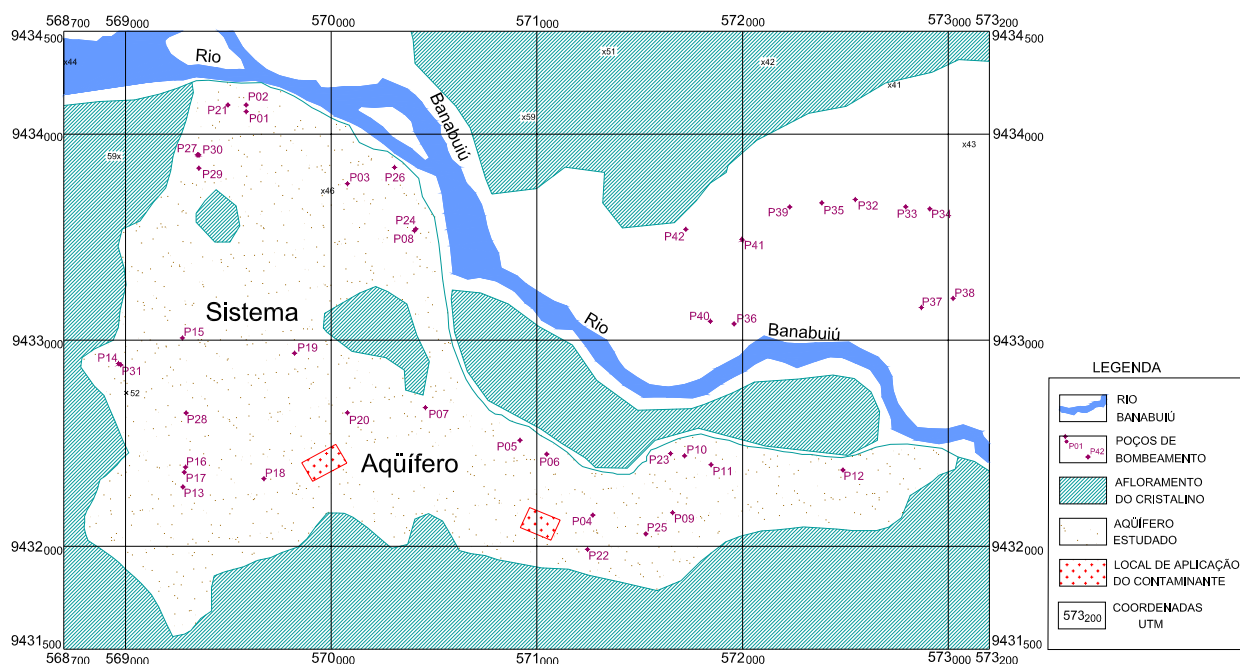


Figura 2 – Desenho esquemático da geometria do sistema aquífero, com os poços de bombeamento e locais de aplicação do contaminante.

Características hidráulicas do aquífero

A condutividade hidráulica pode ser definida como sendo a densidade de fluxo por unidade de gradiente de potencial. A condutividade hidráulica é um parâmetro que expressa a facilidade com que um fluido é transportado através do meio poroso. Esse parâmetro leva em consideração as características do meio, incluindo porosidade, tamanho e distribuição das partículas, forma e arranjo das mesmas, bem como as características do fluido que está escoando.

O aquífero é composto de duas camadas: uma superior, formada de material argiloso com condutividade hidráulica de 10^{-6} m/s; e outra inferior, constituída de material arenoso com condutividade hidráulica de $2,4 \times 10^{-3}$ m/s.

A transmissividade corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero. Pode-se conceituá-la como a taxa de escoamento através de uma faixa vertical do aquífero com largura unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário (CABRAL, 1997). A transmissividade do aquífero, determinada a partir de um teste de bombeamento no local, é de $3,58 \times 10^{-2}$ m²/s.

O coeficiente de armazenamento de um aquífero é definido como o volume de água retirado por unidade horizontal de área e por decréscimo unitário do lençol freático. Para aquíferos livres, o

coeficiente de armazenamento pode também ser chamado de produção específica (*specific yield* - S_y), que é o volume de água liberado de um volume unitário de aquífero saturado drenado pela queda no lençol freático (BOUWER, 1978). O coeficiente de armazenamento do aquífero é de $6,17 \times 10^{-3}$.

O armazenamento específico de um aquífero saturado é definido como o volume de água liberado por um volume unitário do aquífero submetido a um decréscimo unitário de carga hidráulica. O mecanismo de liberação da água nos aquíferos confinados é bem diferente no caso de aquíferos livres. Nos aquíferos livres a água é liberada para poços ou fontes, principalmente em função da drenagem dos poros. Os vazios passam a serem ocupados pelo ar e o nível freático fica mais baixo (CABRAL, 1997). Para o aquífero estudado, o armazenamento específico determinado foi de $4,10 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$.

Características físicas do aquífero

A porosidade de um solo ou material rochoso é a percentagem do volume total de material que é ocupado por poros ou interstícios. Estes poros podem ser preenchidos com água se o material é saturado, ou com ar e água se o material é não-saturado. A porosidade total pode ser definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total. Levando em consideração o material que constitui o aquífero, a condutividade hidráulica e os valores apresentados na literatura, o valor de porosidade utilizado nas simulações foi de 0,43.

A porosidade efetiva de um material pode ser definida como a quantidade de água fornecida por unidade de volume do material, ou seja, a razão entre o volume de água efetivamente liberada de uma amostra de rocha porosa saturada e o volume total. De acordo com a condutividade hidráulica e o tipo de material que constitui o aquífero, o valor da porosidade efetiva utilizado nas simulações foi de 0,33.

Dados de entrada do modelo

Os dados de entrada exigidos pelo modelo computacional, além das características físicas e hidráulicas do aquífero, englobam os dados de vazão dos poços de bombeamento, as características hidráulicas do rio Banabuiú, os dados de pluviometria do local e as características do contaminante estudado.

A área estudada possui 31 poços de bombeamento inseridos no aquífero, e 11 poços de bombeamento fora dos limites do aquífero, mas que influenciam no fluxo de água subterrânea. Os dados de vazão, coordenadas, cotas e níveis desses poços foram fornecidos pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH).

As características do rio Banabuiú foram retiradas da série histórica de cotas da estação (1973 a 2001) da Estação Fluviométrica Morada Nova II. A condutividade hidráulica do leito do rio é de 10^{-5} m/s, compatível com estudos efetuados em regiões semi-áridas.

Os dados de Pluviometria foram retirados da série histórica (1964 a 2000) do Posto Morada Nova, monitorado pela FUNCEME, disponíveis na rede mundial, através do Atlas Eletrônico dos Recursos Hídricos e Meteorológicos do Ceará, elaborado pela Secretaria de Recursos Hídricos - SRH (2003).

Apesar da principal fonte de contaminação desse aquífero é devido á atividade agrícola, o contaminante usado nas simulações é de natureza conservativa. Não foram levadas em consideração as reações de decaimento e sorção. A concentração do contaminante é de 100 mg/l e a dispersividade longitudinal utilizada foi de 10 m.

Condições de contorno

O aquífero estudado apresenta condições de contorno do Tipo 1 (condição de Dirichlet) na sua porção nordeste, onde faz fronteira com o rio Banabuiú; e do Tipo 2 (condição de Newmann) nas porções sul e oeste, sendo limitado por rochas do embasamento cristalino, onde o fluxo de água subterrânea é nulo.

Malha de diferenças finitas

A área de estudo foi dividida em um malha retangular com base no mapa de localização dos poços e discretizada com espaçamento de 100 m. Nos locais onde estão construídos os poços a malha de diferenças finitas foi refinada com espaçamento de 25 m (Figura 3).

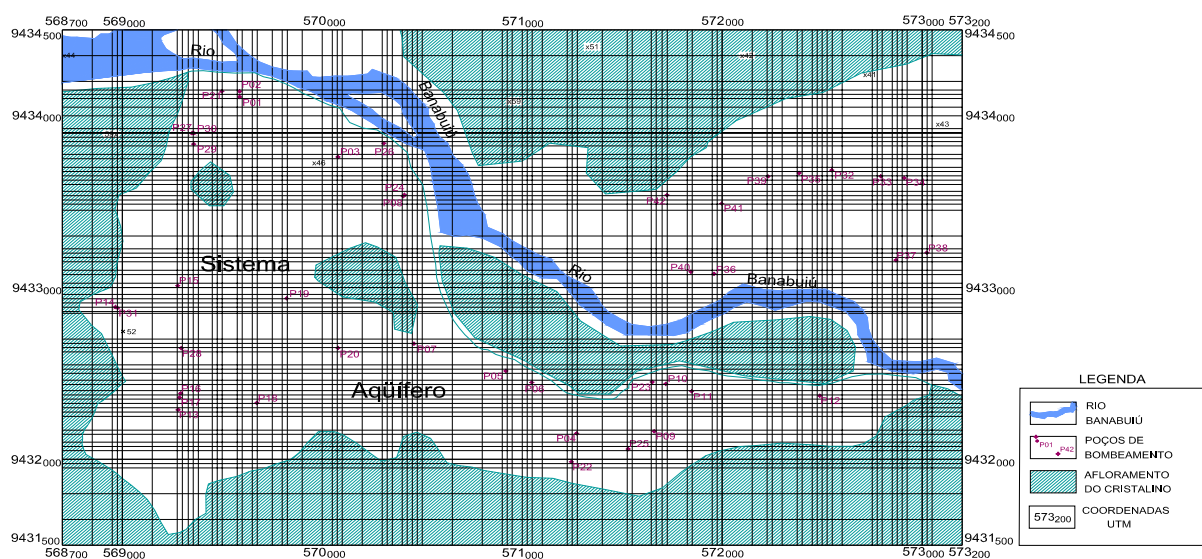


Figura 3 – Malha de diferenças finitas gerada para o aquífero estudado.

Cenários simulados

Neste trabalho foram simulados quatro cenários diferentes (ver Figura 4) visando caracterizar o caminhamento de contaminantes na água subterrânea em dois períodos distintos – o período chuvoso e o período seco. Também foram feitas simulações para regime transiente e regime permanente. É importante ressaltar que, em nenhuma das simulações, foram considerados os valores de evapotranspiração.

As duas primeiras simulações foram feitas durante o período chuvoso que engloba os meses de janeiro a junho. As duas últimas simulações foram realizadas durante o período seco, que ocorre de julho a dezembro.

A primeira simulação foi feita para aplicação do contaminante nos dois locais escolhidos, durante o período chuvoso, com regime de escoamento permanente (estacionário).

A segunda simulação também levou em consideração a aplicação do contaminante durante o período chuvoso. A diferença desta simulação para a anterior está no fato de que foi realizada com regime de escoamento transiente.

A terceira simulação foi realizada com a aplicação do contaminante escolhido, durante o período seco, sendo efetuada no regime de escoamento permanente (estacionário).

A quarta simulação também contou com a aplicação do contaminante escolhido nos mesmos locais da simulação anterior, sendo executada no regime de escoamento transiente, durante o período seco.

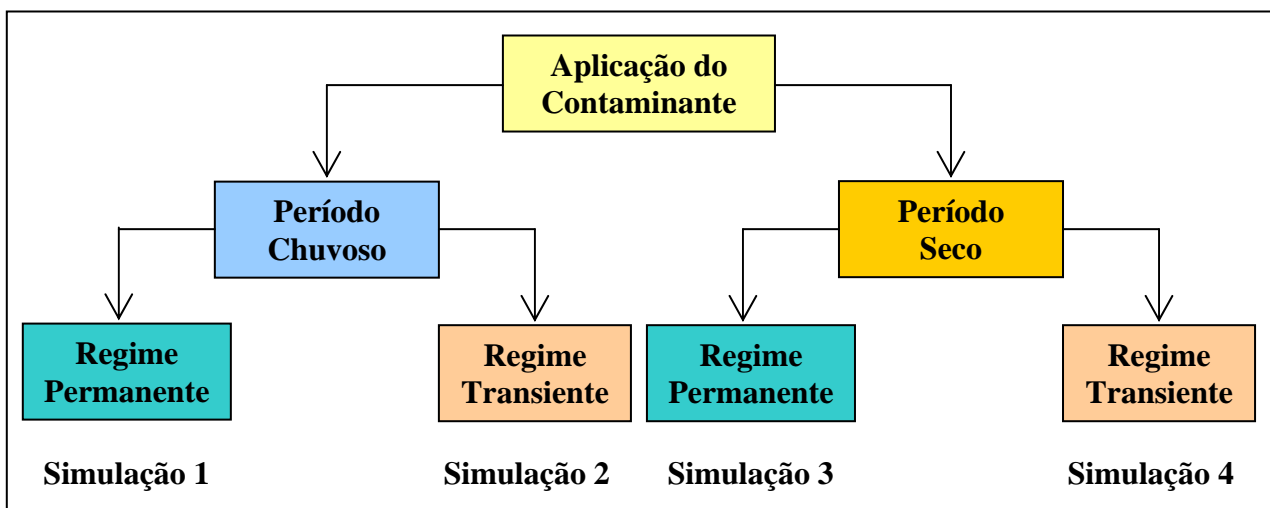


Figura 4 – Cenários simulados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Simulação 1

A Figura 5 apresenta o caminho preferencial das partículas do contaminante aplicado para as condições inicialmente formuladas. O tempo teórico necessário para que o contaminante atinja o recurso hídrico superficial, ou seja, o Rio Banabuiú seria de 720 dias. Este valor foi obtido levando-se apenas em consideração a dispersão do contaminante, não tendo sido considerada a absorção de parte do contaminante pelas plantas, sua adsorção em partículas do solo e sua degradação natural. É importante ressaltar que esse tempo foi calculado para as condições de fluxo do período chuvoso, quando a água subterrânea flui do aquífero para o rio. Grande parte das partículas foi capturada pelos poços durante a operação de bombeamento, gerando preocupação quanto à qualidade da água fornecida por tais poços.

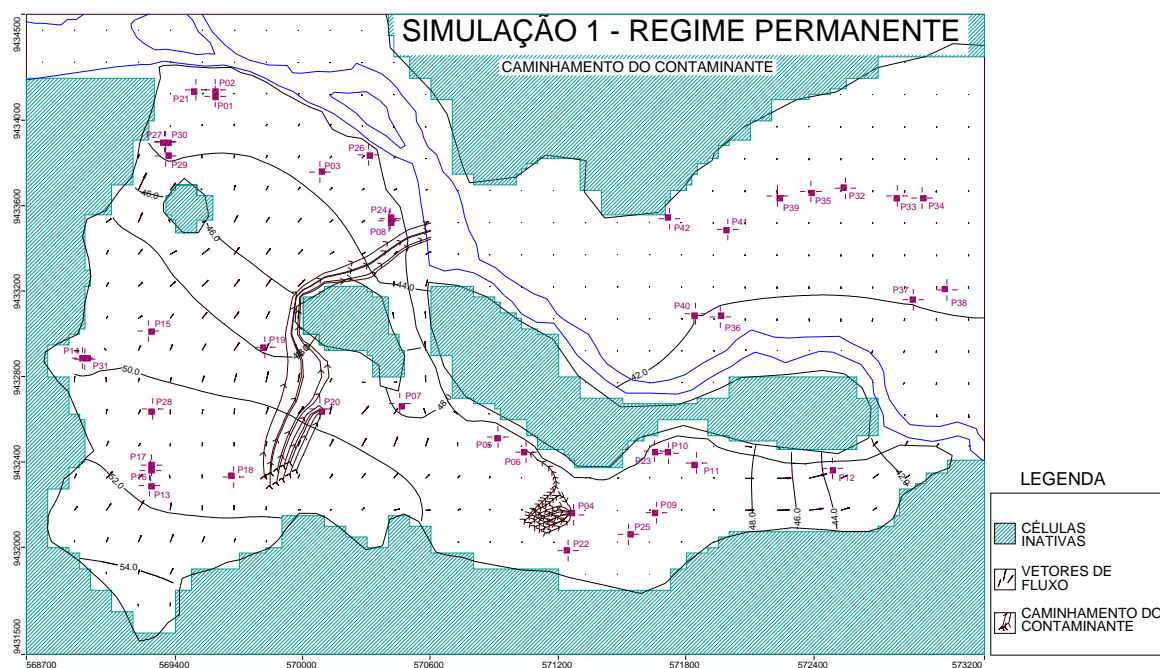


Figura 5 – Caminhamento do contaminante para a Simulação 1.

Simulação 2

A Simulação 2 também foi realizada para estudar o caminhamento do contaminante, sob condições transientes, com passo de tempo de 10 dias e multiplicador de 1,2. Os resultados apresentados aqui são referentes ao final do período chuvoso (após 181 dias), para que pudéssemos compará-los com os resultados obtidos na Simulação 1. A concentração do contaminante (1.000,00 mg/l) e a dispersividade longitudinal (10,00 m) foram mantidas as mesmas.

A Simulação 2 apresentou como resultado singular o fato de que, devido ao baixo gradiente hidráulico da camada superior, não há fluxo suficiente para transportar o contaminante através do

aquífero. Este resultado nos sugeriu realizar outra simulação, nas mesmas condições, porém, aplicando o contaminante na camada inferior, onde o fluxo de água subterrânea é maior. Esta nova simulação nos forneceu o provável caminhamento do contaminante para condições de escoamento transiente, exposto na Figura 6. Nessa situação, o contaminante não atinge o rio Banabuiú, mesmo após um longo período de tempo e suas partículas são captadas pelos poços.

O modelo de transporte de partículas, MODPATH, foi inicialmente desenvolvido para tratar de problemas em regime permanente. Assim, o algoritmo de caminhamento das partículas, realiza as simulações em regime transiente usando uma série de períodos de fluxo em regime permanente. As camadas que apresentam lençol freático representam uma complicação adicional em análises de caminhamento de partículas para regime transiente porque o lençol freático é na verdade uma condição de contorno que se move. O MODPATH analisa essa condição de contorno móvel de forma aproximada usando a coordenada vertical local para ajustar a coordenada vertical absoluta no começo de cada passo de tempo para analisar as mudanças na espessura saturada de um passo de tempo para o próximo. Assim, nos casos onde não há uma componente vertical de fluxo significativa, o MODPATH mantém a partícula no topo da célula (POLLOCK, 1994).

Desta forma, as diferenças apresentadas pelas Simulações 1 e 2 são bastante representativas, sendo devidas, principalmente, às aproximações consideradas pelo modelo de transporte de massa para aquíferos livres.

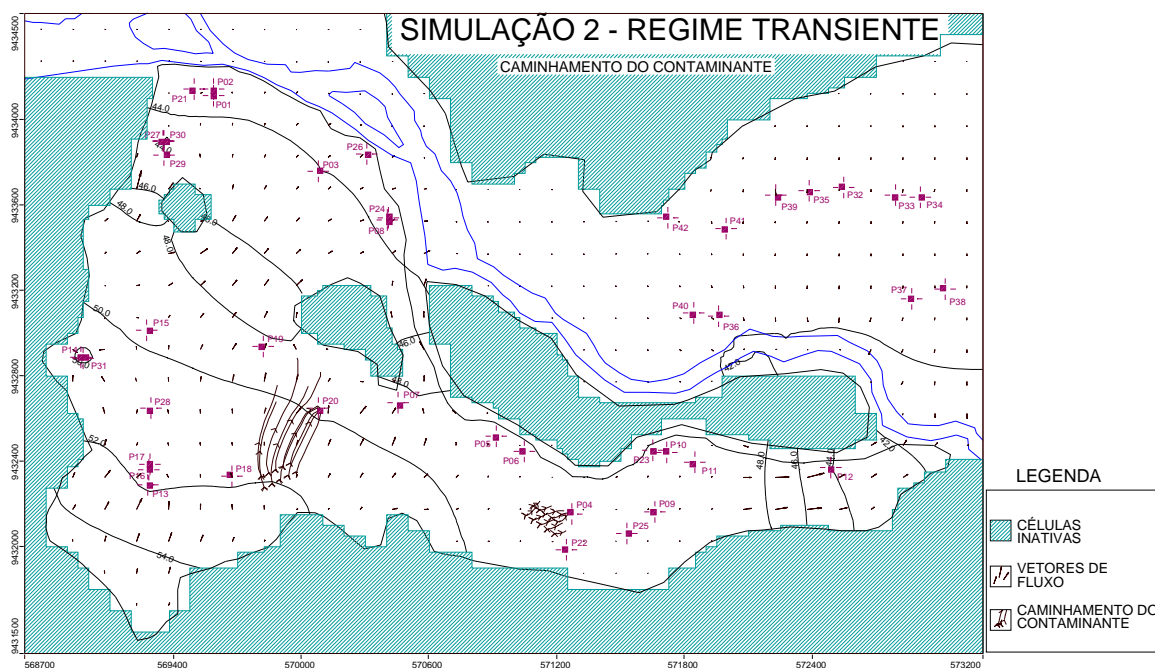


Figura 6 – Caminhamento do contaminante para a Simulação 2.

Simulação 3

A Simulação 3 foi realizada para estudo de transporte do contaminante, sob condições de regime permanente (estacionário), durante o período seco (184 dias). A concentração do contaminante e a dispersividade longitudinal foram mantidas as mesmas. A Figura 7 apresenta o caminho preferencial das partículas do contaminante aplicado, para as condições inicialmente formuladas. No período seco, a recarga é muito pequena e o rio abastece o aquífero, modificando o sentido do fluxo da água subterrânea, em relação àquele obtido pelas simulações realizadas no período chuvoso. É de fundamental importância destacar que todas as partículas do contaminante são capturadas pelos poços de bombeamento, fato que pode comprometer a qualidade da água dos poços para determinados tipos de uso.

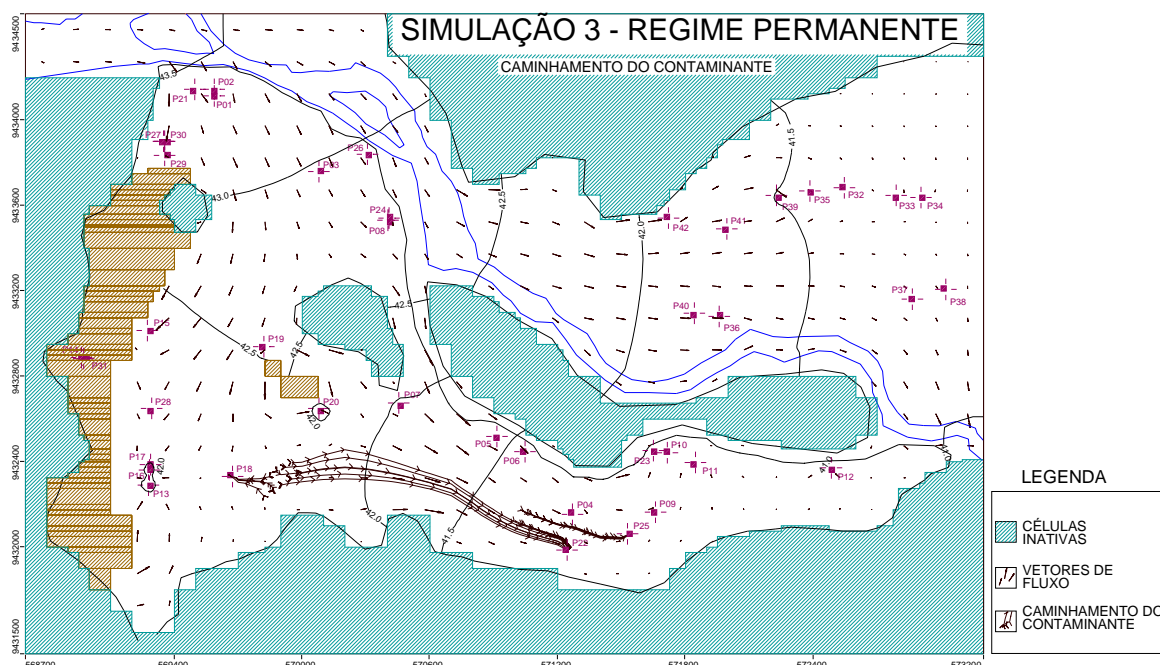


Figura 7 – Caminhamento do contaminante para a Simulação 3.

Simulação 4

A Simulação 4 também foi realizada para estudo de transporte do contaminante, sob condições transientes, com passo de tempo de 10 dias, multiplicador de 1,2. O resultados aqui apresentados são referentes ao final do período seco (184 dias).

De forma similar ao que se observou para o período chuvoso, o contaminante aplicado na camada superior não foi transportado pelo aquífero, devido às baixas velocidades encontradas nessa camada. Assim, foi feita nova simulação, com os mesmos dados de entrada da Simulação 4, no entanto, aplicando-se o contaminante na camada inferior, onde o fluxo de água subterrânea é maior. Esta nova simulação nos forneceu o provável caminhamento do contaminante para condições de

regime transiente, exposto na Figura 8. Nesta situação, o contaminante também possui todas as suas partículas captadas pelos poços, durante a operação de bombeamento.

Este resultado é explicado pelas mesmas razões expostas anteriormente para a Simulação 2. As diferenças nos resultados das Simulações 3 e 4 são bastante representativas, sendo devidas, principalmente, às aproximações consideradas pelo modelo de transporte de massa para aquíferos livres.

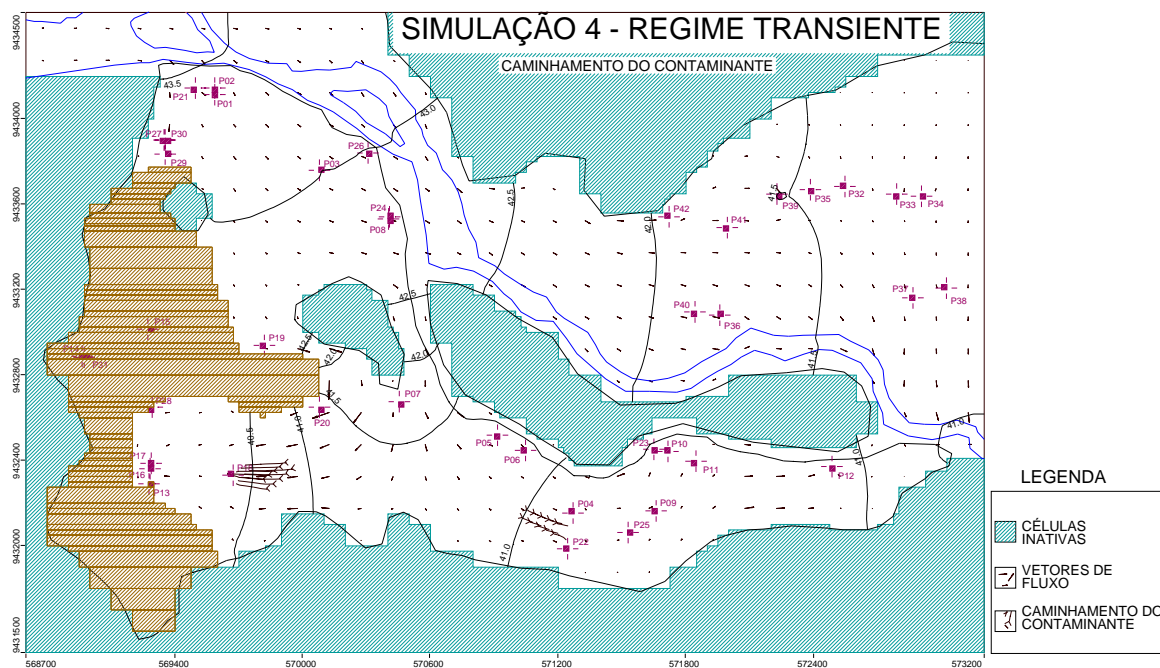


Figura 8 – Caminhamento do contaminante para a Simulação 4.

CONCLUSÕES

O conhecimento da hidrogeologia e da dinâmica local de um sistema aquífero é fator fundamental para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. No entanto, dados de campo em quantidade e qualidade confiáveis são bastante dispendiosos. A modelagem matemática nos fornece condições de simular o sistema real partindo de dados de campo em quantidades significativamente menores, o que implica na diminuição drástica dos custos de investigação.

Os resultados obtidos mostraram que é imperioso o monitoramento constante da qualidade da água retirada dos poços de bombeamento juntamente com o controle mais efetivo do tipo de defensivos agrícolas (biodegradáveis ou não), uma vez que foi evidenciado o alto risco de contaminação desses poços através do transporte do contaminante veiculado pela água subterrânea.

O modelo matemático utilizado nesta pesquisa demonstrou ser capaz de uma aplicação muito mais ampla do que apenas simular condições de fluxo de água subterrânea, podendo ser utilizado

como ferramenta para previsão de cenários, proteção de mananciais subterrâneos, avaliações de potencialidade hídrica e apresentar alternativas de remediação de áreas contaminadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDERSON, M.P.; WOESSNER, W.W. (1992). *Applied Groundwater Modeling – Simulation of Flow and Advective Transport*. San Diego, C.A., Academic Press, Inc., 381 pp.
- [2] BOUWER, H. (1978). *Groundwater Hydrology*. McGraw-Hill Book Company.
- [3] CABRAL, J.P. (1997). *Movimento das Águas Subterrâneas*. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J. (Coord.) *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE. Capítulo 3.
- [4] COGERH (2003). *Monitoramento do Aquífero Aluvionar do Rio Banabuiú – Perímetro Irrigado de Morada Nova*. Fortaleza, Ceará. Comunicação pessoal.
- [5] DNOCS (2003). *Perímetro Irrigado Morada Nova*. Disponível em: <http://www.dnocs.gov.br/ppi/ce/morada_nova.html> Acesso em: 03 Ago. 2003.
- [6] IBGE (1999). *Diagnóstico Ambiental da Bacia do Rio Jaguaribe – Diretrizes Gerais para a Ordenação Territorial*. Salvador. Disponível em: <http://www1.ibge.gov.br/home/geografia/ambientais/diagnosticos_levantamentos/jaguaribe/jaguar.pdf> Acesso em: 20 ago. 2003.
- [7] IPLANCE (2000). *Perfil básico municipal: Morada Nova*. Fortaleza: Edições IPLANCE. 27p.
- [8] POLLOCK, D.W. (1994) *User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey Open-File Report 94-464.
- [9] PRICKETT, T.A.; LONNQUIST, C.G. (1971). *Selected Digital Computer Techniques for Groundwater Resources Evaluation*. Bulletin 55, Illinois State Water Survey, 62 pp.
- [10] PROASNE (2003). *Modelamento Matemático da Área de Recarga do Aquífero Açu, Rio Grande do Norte – Relatório Final*. Disponível em: <<http://proasne.net/acufinalreport.html#Tratamento>> Acesso em: 17 out. 2003.
- [11] SRH (2003). *Atlas Eletrônico dos Recursos Hídricos e Meteorológicos do Ceará*. Disponível em: <<http://atlas.secrel.com.br>> Acesso em: 03 set. 2003.