

# MODELAGEM DOS FLUXOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA REGIÃO METROPOLITANA DE JOÃO PESSOA (PB) UTILIZANDO FERRAMENTAS DE HIDROLOGIA EM SIG

FILIPE BIAGGIONI QUESSADA GIMENES  
EESC/USP – São Carlos/SP - Brasil  
fibiaggioni@gmail.com

OSWALDO AUGUSTO FILHO  
EESC/USP – São Carlos/SP - Brasil  
oafilho@sc.usp.br

WANESSA CARTAXO SOARES  
EESC/USP – São Carlos/SP - Brasil  
wanessacs@gmail.com

## RESUMO ABSTRACT

Este trabalho mostra o resultado da aplicação de algumas ferramentas computacionais de hidrologia disponíveis em um programa de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Elas possibilitam a modelagem dos fluxos de água subterrânea, permitindo prever sua dinâmica e simular vazamentos de poluentes. Os estudos foram desenvolvidos na região metropolitana de João Pessoa (PB), utilizando mapa topográfico digital na escala de 1:10.000, com curvas de nível em intervalos de 5 metros e pontos cotados em metros. Os dados de profundidade de nível d'água subterrânea foram obtidos a partir de furos de sondagem à percussão. Os resultados obtidos permitiram avaliar preliminarmente o desempenho dessas ferramentas, que podem ser úteis em estudos e ações de gestão ambiental dos recursos hídricos subterrâneos.

**Palavras-Chave:** Fluxo hídrico subterrâneo, Sistema de Informações Geográficas – SIG, Ferramentas de Hidrologia.

This paper studies and applies some computer hydrology tools available in a Geographical Information System (GIS) software. They can be able modeling groundwater flow, allowing to predict its dynamics and to simulate the leakage of pollutants. The studies were developed in the metropolitan region of João Pessoa (PB), using digital topographic map at the scale of 1:10,000, with topographic contours in intervals of 5 meters and spot elevations rated in meters. The water level depth data were obtained from percussion boreholes. The obtained results provided to evaluate preliminarily the performance of these tools, which can be useful in studies and actions of environmental management of the groundwater resources.

**Keywords:** Groundwater Flow, Geographical Information System – GIS, Hydrology Tools.

## 1 INTRODUÇÃO

De maneira simplificada, toda água que ocupa vazios em formações rochosas ou no regolito é classificada como água subterrânea. A infiltração

é o processo de maior importância para a recarga de água no subsolo e o volume e velocidade em que ela ocorre depende de vários fatores. Unidades rochosas ou de sedimentos, porosas e permeáveis, que armazenam e transmitem volumes

significativos de água subterrânea passíveis de serem explorados pela sociedade são chamadas de aquíferos. O estudo dos aquíferos visando à exploração e proteção da água subterrânea constitui um dos objetivos mais importantes da hidrogeologia (Teixeira et al., 2003).

Os aquíferos são classificados em função da pressão das águas em suas superfícies limítrofes superior e inferior, e também em função da capacidade de transmissão de água destas camadas. O aquífero livre (ou freático) possui como limite superior uma superfície freática, na qual todos os pontos se encontram submetidos à pressão atmosférica (Feitosa & Manoel Filho, 2000).

O fluxo de água através de aquíferos, a maioria dos quais é um meio poroso natural, pode ser expresso pela conhecida Lei de Darcy, mostrada na equação (1) (Todd, 1959), desenvolvida pelo engenheiro francês Henry Darcy, em 1856. Seu experimento se baseou na medição da vazão de água  $Q$  com um cilindro preenchido por material arenoso, para diferentes gradientes hidráulicos. O fluxo de água pelo cilindro (definido como vazão específica -  $q$ ) para cada gradiente foi calculado pela relação entre a vazão  $Q$  e a área  $A$  de seção do cilindro.

$$q = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

Darcy concluiu que a vazão de escoamento era proporcional à seção transversal do cilindro, à diferença de cargas hidráulicas entre os dois pontos de medição e inversamente proporcional a distâncias desses dois pontos (Feitosa & Manoel Filho, 2000).

O fluxo da água na zona saturada (poros totalmente preenchidos por água) depende do potencial hidráulico, e os contaminantes podem espalhar-se por grandes áreas, cobrindo longas distâncias, após períodos de tempo variável. Caracterizam-se assim as plumas de contaminação com concentrações variáveis, no espaço e no tempo, dependendo das condições hidrogeológicas locais (Tressoldi & Consoni, 1994). Os mecanismos que atuam no transporte de um poluente em um meio poroso são: fluxos advectivo, dispersivo e difusivo; interações entre sólido e soluto; reações químicas; e fenômenos de decaimento (Feitosa & Manoel Filho, 2000).

A pesquisa relacionada a este artigo envolveu a modelagem dos fluxos superficiais e subterrâneos em uma área de estudo contida na região metropolitana de João Pessoa (PB), perfazendo uma área total de 208,61 km<sup>2</sup> e 13 mapas topográficos na escala 1:10.000, com curvas de nível em intervalos de 5 metros, pontos cotados em metros e a rede de drenagem cartografada nestes mapas.

O trabalho apresentado neste artigo aplica e analisa quatro ferramentas de hidrogeologia subterrânea disponíveis no Sistema de Informação Geográfica - SIG ArcMap 9.1 (ESRI, 2010), são elas: 1) *Darcy Flow* (fluxo de Darcy); 2) *Darcy Velocity* (velocidade de Darcy); 3) *Particle Track* (traçado de partícula); 4) *Porous Puff* (meios porosos). As modelagens foram realizadas em uma bacia na área urbana, contida na área de estudo descrita, contendo 26 sondagens à percussão realizadas durante o período chuvoso da área de estudo, para que os valores de profundidade de nível d'água obtidos nestas sondagens refletissem a mesma condição pluviométrica, de forma a gerar uma superfície condizente com a realidade. Vale ressaltar que todas as modelagens aplicadas consideraram apenas o aquífero livre, em função das profundidades de nível d'água obtidas pelas sondagens a percussão.

Os resultados obtidos permitiram avaliar preliminarmente o desempenho destas ferramentas, que podem ser úteis em estudos e ações de gestão ambiental dos recursos hídricos subsuperficiais, especialmente em áreas contaminadas. Os estudos realizados fizeram parte de pesquisas de iniciação científica e de doutorado.

## 2 MÉTODO

### 2.1 Etapas de Trabalho

O método utilizado no presente trabalho consistiu basicamente nas seguintes etapas:

- a) Planejamento: nesta etapa foi feita a definição dos objetivos da pesquisa, bem como realizada uma pesquisa bibliográfica preliminar e foi estabelecido o método e as principais atividades a serem executadas;
- b) Revisão Bibliográfica: foi realizada a revisão bibliográfica sistemática sobre os temas técnico-científicos principais abordados pelo estudo (conceitos gerais sobre a dinâmica da

água de subsuperfície, ferramentas de análise desta dinâmica utilizando SIG) a fim de possibilitar embasamento teórico para aplicação das ferramentas;

- c) Levantamento de dados: foi feita a inserção das informações no banco de dados a fim de constituir-se a base topográfica. Essas informações são topográficas básicas (curvas de nível, pontos cotados e drenagens) e níveis de água subterrânea, obtidos a partir de 26 furos de sondagem. Além de dados levantados na literatura de espessura saturada, porosidade efetiva e transmissividade das formações existentes na área de estudo;
- d) Ensaio de aplicação das ferramentas: tendo os dados previamente levantados foi possível aplicar as ferramentas de dinâmica das águas de subterrânea, que estão disponíveis no software de SIG *ArcMap 9.1* (ESRI, 2010);
- e) Análise dos resultados: após aplicação das ferramentas de modelagem do SIG, os resultados obtidos puderam ser avaliados em função do que era esperado; e
- f) Conclusões: com os resultados avaliados foi possível elaborar as conclusões, evidenciando potenciais aplicações e possíveis limitações das principais ferramentas utilizadas.

O plano de informação básico para aplicação das ferramentas foi o da superfície freática, que foi obtido a partir dos dados dos furos de sondagem a percussão. Por esse motivo, é importante ressaltar que esses dados apresentam algumas limitações como a quantidade e distribuição das sondagens na área, além da possibilidade de algumas medições do nível d'água não refletirem a condição de estabilização deste nível.

## 2.2 Técnicas Aplicadas

As quatro ferramentas de hidrologia subterrânea (Tabela 1), anteriormente citadas, foram aplicadas gerando resultados que permitiram visualizar a dinâmica dos fluxos de água subterrânea (na zona saturada). A seguir será descrito o método de aplicação dessas ferramentas.

Primeiramente, foi necessário gerar um raster (arquivo matricial) contendo a superfície freática, um raster contendo valores da espessura saturada, um raster com valores de porosidade efetiva e outro com valores da transmissividade do aquífero (todos os rasters de entrada tinham o mesmo tamanho de célula). Estas são as entradas para utilização da primeira ferramenta *Darcy Flow*, que calcula o balanço do volume residual para cada célula. A ferramenta considera um fluxo constante dentro do aquífero a ser modelado.

Em seguida, aplicou-se a ferramenta *Darcy Velocity*, que utiliza as mesmas entradas da ferramenta descrita anteriormente e retorna os grids contendo a direção e magnitude do fluxo. Esses dois resultados foram combinados para gerar o campo de vetores de fluxo.

O passo seguinte foi inserir pontos de interesse na área para simular a trajetória que uma partícula saindo desses pontos descreveria. Para isso foi utilizada a ferramenta *Particle Track* que recebeu como entrada os rasters de magnitude e direção de fluxo gerados anteriormente, além das coordenadas espaciais do ponto de interesse, neste caso, foram inseridos dois pontos. O algoritmo da ferramenta utiliza um esquema previsor-corretor para prever a posição futura de uma partícula

**Tabela 1** – Ferramentas de análise hidrológica disponíveis no SIG ArcMap9.1.

Ferramentas	Descrição
<i>Darcy Flow</i> (Fluxo de Darcy)	Calcula o balanço de volume residual de água subterrânea (diferença entre o fluxo que entra e o que sai) para o regime de fluxo constante em um aquífero.
<i>Darcy Velocity</i> (Velocidade de Darcy)	Calcula o vetor velocidade da água subterrânea para cada célula utilizando a Lei de Darcy.
<i>Particle Track</i> (Traçado de Partícula)	Calcula o caminho e o tempo de viagem de uma partícula através de um campo de velocidade para um dado local de início, determinando a sua localização futura. Esta ferramenta gera dados matriciais e vetoriais, pois gera uma série de segmentos de linhas (vetores) de uma malha de dados (matriz).
<i>Porous Puff</i> (Meios Porosos)	Calcula a dispersão bidimensional de um poluente em um meio poroso uniforme, para uma fonte de poluição instantânea. Utiliza-se da equação de advecção-dispersão (Bear,1972; Freeze e Cherry, 1979; Marsily, 1986). Os resultados produzidos por essa ferramenta são altamente idealizados e são adequados para uma estimativa aproximada da direção e características do transporte do poluente.

Fonte: ESRI(2010)

baseado no campo local de velocidade de fluxo, interpolado do centro da célula mais próxima. Gerou-se também, um polígono contendo a trajetória descrita pela partícula. Para utilizar essa ferramenta foi necessário alocarem-se pontos de interesse, a partir dos quais foi determinado o caminho da partícula.

Finalmente, aplicou-se a ferramenta *Porous Puff* que recebe como entrada o arquivo gerado pela ferramenta *Particle Track*, bem como os rasters de porosidade efetiva e de espessura saturada, além da massa de contaminante introduzida. Essa ferramenta permite traçar a pluma do contaminante em diferentes intervalos de tempo.

### 3 RESULTADOS E ANÁLISE

#### 3.1 Darcy Flow (Fluxo de Darcy)

Para gerar o arquivo matricial (raster) contendo informações da superfície freática foram utilizados os dados de nível de água subterrânea de furos de sondagem. A partir dos valores de nível d'água dos 26 furos de sondagem existentes na área de interesse, foi possível interpolar uma superfície d'água subterrânea utilizando a ferramenta

existente chamada *Topo To Raster*. O processo é semelhante ao da geração de um Modelo Digital de Elevação (MDE), a partir da interpolação de cotas topográficas conhecidas. O resultado obtido foi considerado dentro do esperado, com as cotas mais altas do nível freático coincidindo, aproximadamente, com as cotas mais altas do terreno.

Para verificar a consistência do resultado, além da análise visual também foi feita uma subtração entre o MDE e a superfície gerada, utilizando a ferramenta *Single Map Algebra*. Valores negativos representam pontos que o nível d'água encontra-se acima do terreno, isso só deveria ocorrer nas drenagens. De fato, o resultado, exibido na Figura 1 (recorte do mapa gerado), evidenciou que resultados negativos até valores próximos a um ocorrem nas proximidades das drenagens, indicando um resultado consistente com a realidade.

Para gerar os arquivos matriciais (rasters) contendo valores de espessura saturada, porosidade efetiva e transmissividade, foi necessário consultar a bibliografia para encontrar valores adequados para a formação que se encontra na área. São elas: a Formação Barreiras e a Formação de Depósitos Quaternários. Os valores adotados desses parâmetros foram sintetizados, conforme mostra a Tabela 2.

**Tabela 2** – Valores máximos, médios e mínimos dos parâmetros de entrada.

Formação	Espessura Saturada (m)	Porosidade Efetiva %	Transmissividade (m <sup>2</sup> /s)
Barreiras	84	5	0,0046
Barreiras	73	5	0,00396
Barreiras	62	5	0,0017
Depósitos Quaternários	80	10	0,0316
Depósitos Quaternários	50	10	0,007
Depósitos Quaternários	20	10	0,000019

\*Adaptado de Monteiro (2002).

Nota-se que foram utilizados valores médios, mínimos e máximos encontrados na bibliografia a fim de permitir uma comparação entre os resultados obtidos para os diferentes valores. Foi também necessário admitir que esses valores são constantes ao longo de cada unidade geológica, ou seja, que não variam verticalmente ou horizontalmente dentro da mesma unidade. Esses valores

foram inseridos na tabela de atributos do tema já existente "unidades geológicas", e em seguida foi utilizada a ferramenta *Polygon To Raster* dentro de *Conversion Tools* para criar o arquivo matricial (raster) contendo os valores do parâmetro de interesse. Esse procedimento foi feito para todos os valores exibidos na Tabela 2. Criaram-se assim, os arquivos matriciais necessários para entrada.

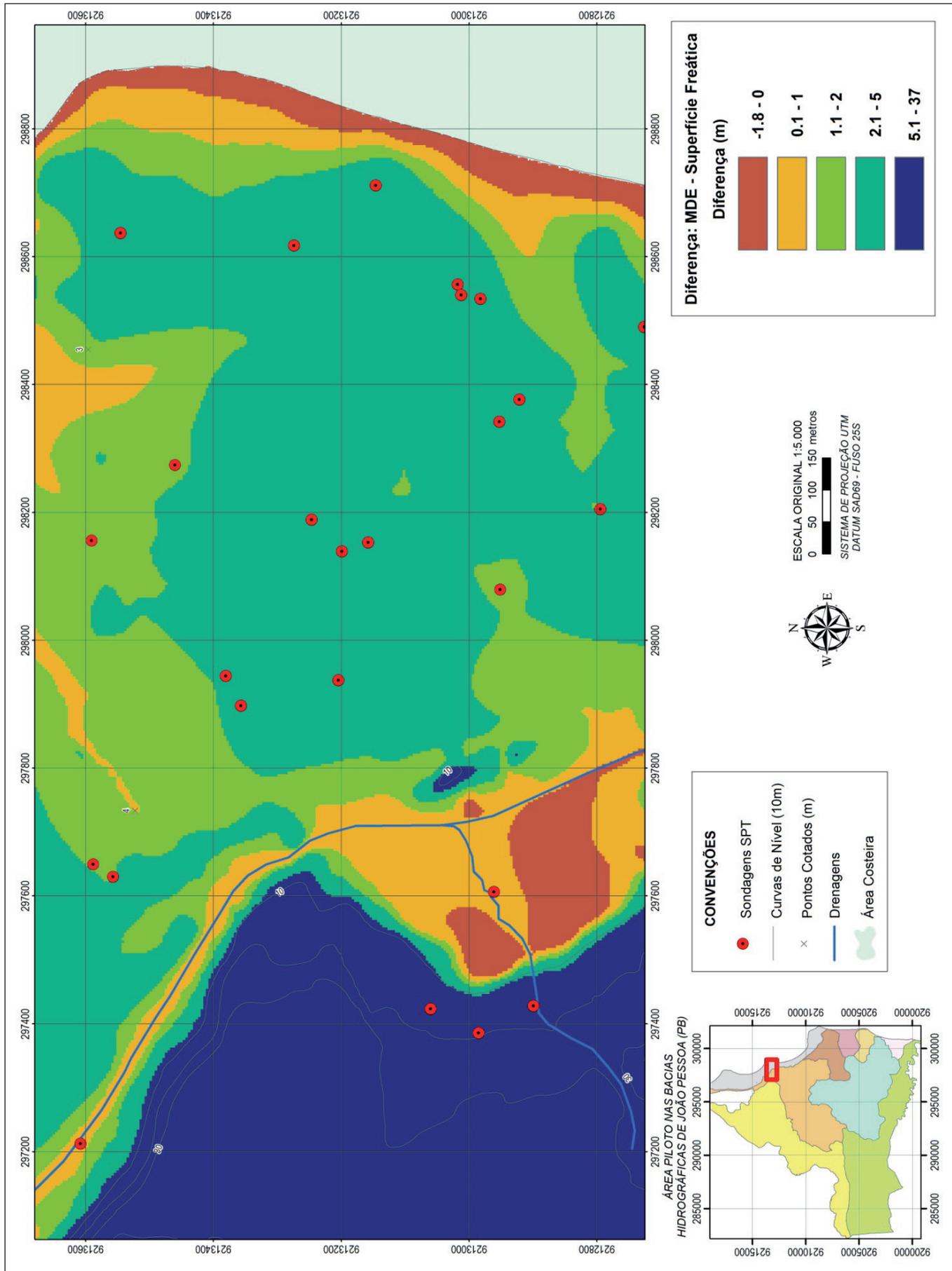


Figura 1 - Diferença entre o MDE e a superfície freática.

Finalmente, foi possível aplicar a ferramenta *Darcy Flow* que calculou o volume residual para cada célula do arquivo matricial (pixel). Como os cálculos são executados através de cada uma das quatro paredes da célula independentemente, é possível que mais ou menos água flua para dentro ou fora de uma célula, resultando em um valor positivo ou negativo de volume residual. Um raster de entrada consistente, sem poços de bombeamento, infiltrações ou vazamentos deve produzir pequenos residuais, próximos à zero. Altos valores residuais indicam que o raster da superfície freática não está adequado com o respectivo raster de transmissividade, porosidade e espessura saturada. Se isso ocorrer, os dados de

entrada são inconsistentes e produzem resultados sem significado.

Neste caso, o residual obtido foi na maior parte da área próximo a zero conforme ilustrado na Figura 2 (recorte do mapa gerado). Se comparados aos resultados obtidos por Oliveira & Augusto Filho (2008), os obtidos na presente pesquisa podem ser considerados mais consistentes, pois os valores foram mais uniformes em toda a área (e próximos de zero). Tal fato pode ser justificado pela existência de mais furos de sondagem na área modelada nesta pesquisa, que permitiram a obtenção de mais dados de nível d'água, resultando em uma interpolação mais condizente com a realidade.

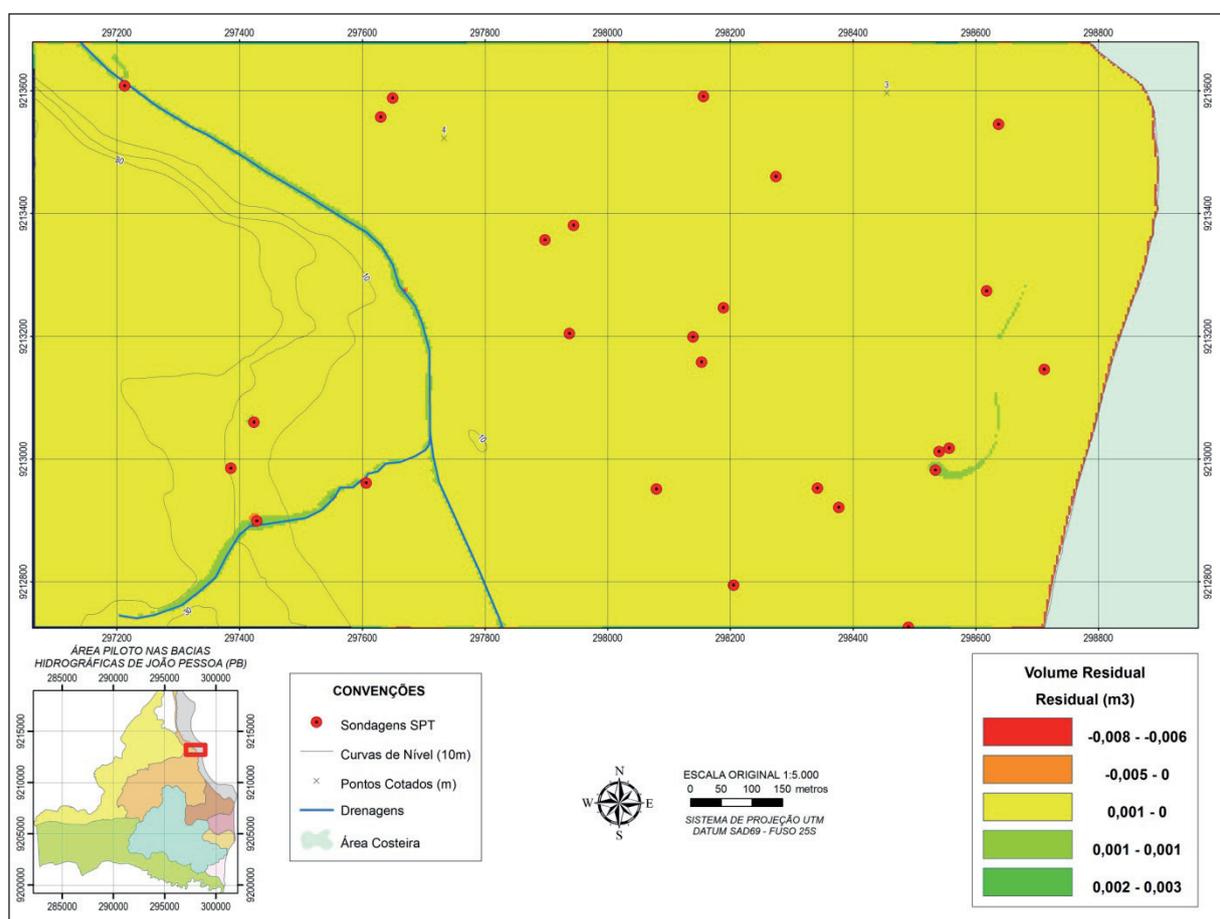


Figura 2 – Valores de volumes residuais.

Para analisar qualitativamente os resultados de residual obtidos, foi feita uma comparação entre os valores de residual com o valor da vazão que sai de cada pixel, que pode ser obtida através do raster de magnitude de fluxo que foi gerado na ferramenta que será descrita no próximo item. Para

obter a vazão que sai de cada pixel, basta multiplicar o arquivo com valores de magnitude pela área de cada pixel (no caso 16 m<sup>2</sup>) utilizando para isso a ferramenta *Single Map Algebra*. Utilizando essa mesma ferramenta calculou-se a porcentagem do residual em relação à vazão que sai de cada pixel.

Para facilitar a visualização do resultado, foi utilizada a ferramenta *Calculate Areas* de modo a obter-se a porcentagem em área de cada faixa de erro. Observou-se que predominam valores de erro entre 1 e 5%, e em segundo lugar valores de erro até 1%, sendo que essas duas faixas principais somadas ocupam, aproximadamente 70% da área total, conforme apresentado na Figura 3. Como o fluxo de água subterrânea não é contínuo e constante, pois existem pontos de vazamentos e infiltrações, torna-se impossível obterem-se residuais nulos em 100% da área. Tal fato justifica as regiões onde o residual foi superior a 5% da vazão de saída.

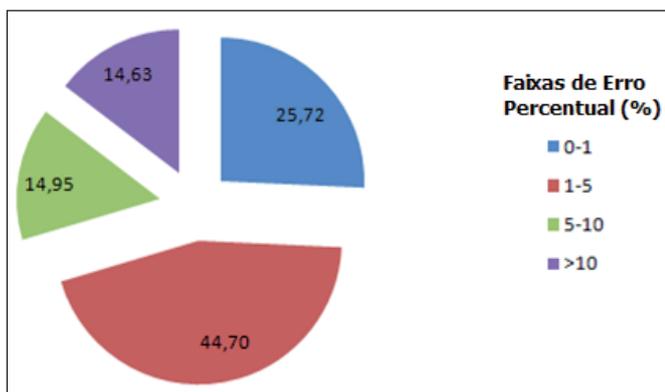


Figura 3 - Faixas de erro percentual comparadas por área.

Em pontos de divisores, são formadas áreas de recarga do aquífero, nesses pontos a infiltração é favorecida, e quando não chove o balanço residual será negativo, com mais água saindo do que entrando. Já em pontos de drenagens, são constituídas áreas de descarga do aquífero, nas quais o aquífero supre as linhas de drenagem, e, conseqüentemente, o balanço será positivo, com mais água entrando do que saindo. Nesses dois casos o valor de residual deverá ser elevado pela própria característica hidrológica, e não por um caso de inconsistência de dados de entrada. Esse resultado mostra que o erro foi baixo, e portanto, o resultado pode ser considerado consistente, confirmando o que havia sido suposto em função dos valores de residual serem próximos à zero.

Esta ferramenta permite indicar o balanço hídrico da água subterrânea e com isso permite identificar se está ocorrendo acúmulo ou retirada de água em determinada região. Se isso for verificado, pode ser um indício de que algum evento

pode estar causando um desequilíbrio no balanço hídrico do local e serve como base para que estudos mais detalhados possam ser realizados.

### 3.2 Darcy Velocity (Velocidade de Darcy)

O fluxo de velocidades é representado por dois rasters, um de magnitude e outro de direção. Estes dois rasters são os resultados desta ferramenta. A fim de melhorar a visualização dos resultados, os rasters de magnitude, que pode ser entendida como vazão específica (em  $\text{m}^3/\text{s.m}^2$ ), e de direção (de 0 a  $360^\circ$ ) foram combinados, gerando um campo de vetores onde o tamanho do vetor indica a magnitude e sua inclinação indica a direção de escoamento. Para isso, foi criado um tema de pontos ao longo de toda a área, e para este tema foram extraídos os valores da direção e magnitude. Dessa forma, foi possível reclassificar a legenda de forma a obter o resultado mostrado na Figura 4, que também apresenta a superfície freática.

Os valores de entrada que produziram melhor resultado foram os valores médios, apresentados na Tabela 2. De fato, analisando-se a Figura 4 (representando os resultados obtidos utilizando os valores médios), verifica-se que este resultado é adequado para a área, pois os fluxos estão se dirigindo dos divisores (áreas de recarga) para as drenagens (áreas de descarga). Apresentando maior magnitude em áreas de maior declividade, que possuem maior gradiente hidráulico, conforme o esperado.

Novamente, comparando-se estes resultados com os de Oliveira & Augusto Filho (2008), nesta pesquisa foram obtidos valores na faixa de 0,01 a 10 m/dia enquanto que na outra os valores encontraram-se na faixa de 0,001 a 0,1 m/dia. Isso ocorre, pois o material (por qual percola a água subterrânea) desta pesquisa é muito mais arenoso do que o da outra pesquisa, e por isso, apresenta valores muito maiores de transmissividade e porosidade, o que favorece o fluxo de água subterrânea.

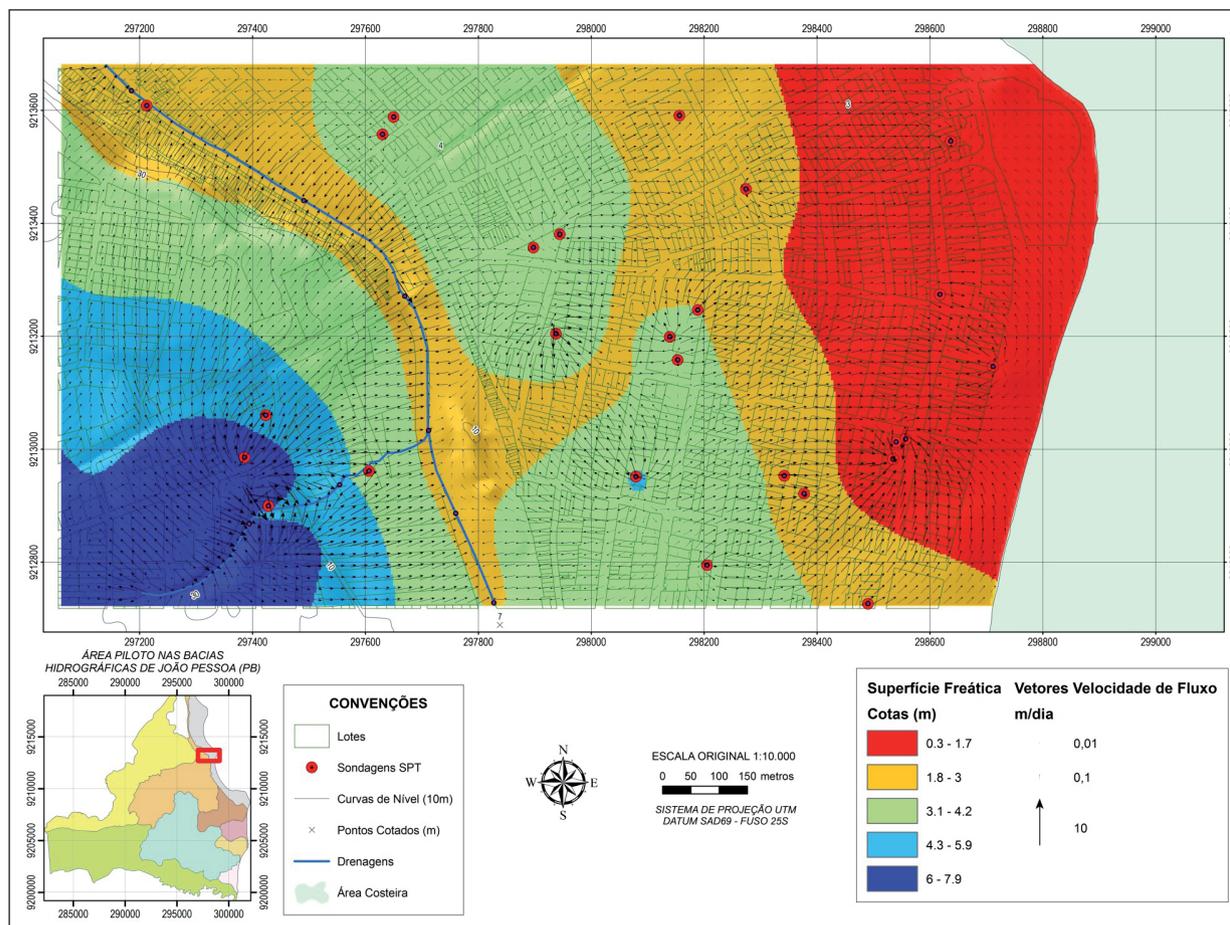


Figura 4 – Vetores Velocidade de Fluxo e Superfície Freática.

Esta ferramenta pode ser aplicada em estudos hidrológicos preliminares, pois permite que se obtenha uma noção da dinâmica da água subterrânea identificando o fluxo da água e serve como base para aplicação das próximas ferramentas que detalham melhor essa dinâmica.

### 3.3 Particle Track (Traçado de Partícula)

A ferramenta retornou um arquivo texto com a posição da partícula em diferentes intervalos de tempo. Foi também gerado o traçado mostrando o caminho de cada partícula de forma a facilitar a visualização. Esse traçado é exibido na Figura 5.

Pode-se observar que o caminho descrito pelas partículas segue tendência do campo de fluxo, sendo que uma das partículas caminha até atingir a drenagem (ponto 1), enquanto a outra descreve um caminho maior (ponto 2) até chegar a um ponto onde os valores de magnitude de fluxo são muito pequenos. Os tempos de percurso total de

cada partícula são, aproximadamente, 2,8 e 17,7 anos para as partículas 1 e 2, respectivamente.

Estes podem ser considerados valores baixos, que se justificam pelo fato do aquífero apresentar valores altos de magnitude de fluxo de água. Tal fato pode resultar, no caso de um vazamento de um poluente, que o mesmo se desloque rapidamente, contaminando grandes áreas em pouco tempo. Este fenômeno foi mais bem avaliado pela próxima ferramenta.

### 3.4 Porous Puff (Meios Porosos)

Para realizar uma simulação de contaminação por vazamento foram considerados os pontos 1 e 2 (utilizados na ferramenta Particle Track) como pontos de vazamento. A ferramenta Porous Puff permite calcular a dispersão em massa de um soluto introduzido no aquífero, assume que o aquífero é misturado verticalmente, ou seja, a concentração é a mesma pela seção vertical. O que permite a aplicação do modelo matemático de dispersão.

Os parâmetros de entrada dessa ferramenta são: porosidade do meio, espessura saturada e caminho da partícula (obtidas anteriormente); quantidade do poluente derramado instantaneamente (foi considerado um valor de contaminante dissolvido igual a 1000 kg); e tempo de dispersão (deve ser menor ou igual ao máximo tempo da trajetória da partícula, foram feitas três simulações, uma com 1 mês, outra com 6 meses e outra com 2 anos, para o ponto 1; e uma com 6 meses, outra com 2,5 anos e outra com 15 anos, para o ponto 2). Outros parâmetros opcionais como dispersividade longitudinal, razão de dispersividade, fator de retardamento e coeficiente de decaimento, foram considerados os valores padrões indicados pela própria ferramenta.

O resultado dessa simulação pode ser visto na Figura 5, por terem sido utilizados três tempos de dispersão, a visualização do deslocamento da pluma ficou facilitada. Verificou-se que as plumas se deslocam rapidamente pelo aquífero, principalmente na área de Depósitos Quaternários pela característica do meio ter elevada porosidade. As plumas apresentam forma elíptica com eixo centrado na trajetória da partícula.

Isso justifica o fato da pluma mudar de sentido de dispersão nos locais onde havia mudança de sentido da trajetória. A pluma gerada no ponto 1 percorre um caminho menor, pois o gradiente hidráulico é maior na região em que se encontra, além de existir a drenagem relativamente próxima ao ponto. Já a pluma que se desloca a partir do ponto 2, percorre um caminho maior e, conseqüentemente, demora um maior tempo para atingir seu ponto final.

Esse tipo de simulação é importante, pois permite prever o comportamento de uma pluma de contaminantes na área, permitindo que no caso de um vazamento, ações mitigadoras sejam tomadas para evitar-se ao máximo a dispersão do contaminante.

As duas últimas ferramentas descritas podem servir de grande auxílio nas áreas de recuperação de áreas degradadas e remediação de áreas contaminadas, pois os dados podem ser trabalhados de forma que resultados de interesse sejam obtidos para decidir se é necessário ou não intervir em uma área de estudo e qual a emergência dessa intervenção, no caso de deslocamento rápido de contaminantes.

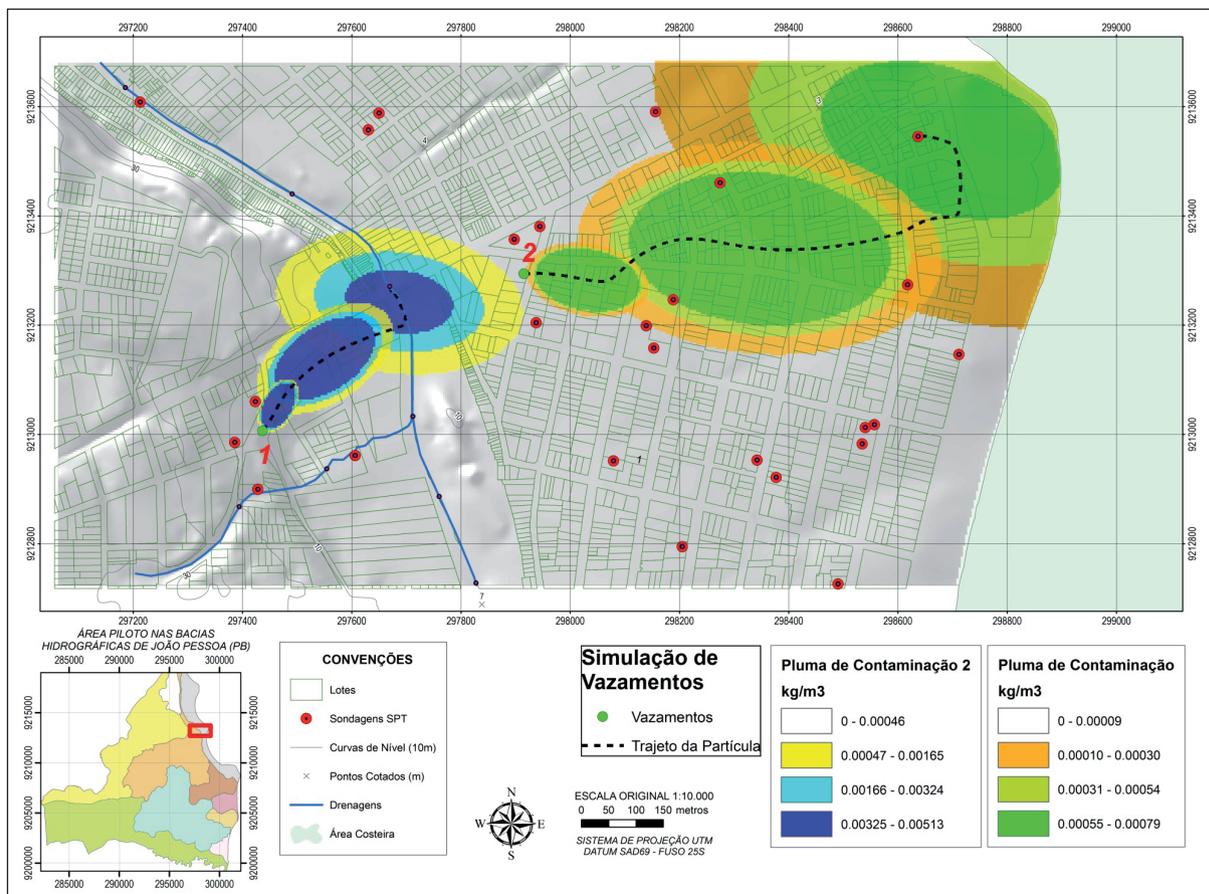


Figura 5 - Plumras de Contaminação e Trajetória das partículas.

## 4 CONCLUSÕES

Conclui-se que as ferramentas *Darcy Flow*, *Darcy Velocity*, *Particle Track* e *Porous Puff* se mostraram bastante úteis para a modelagem da dinâmica da água subterrânea.

A interpolação do nível freático se mostrou bastante válida, pois foi feita utilizando a ferramenta *Topo To Raster*, que é uma ferramenta ideal para gerar MDEs hidrológicamente corretos, e, portanto também pode ser considerada válida para este tipo de interpolação que é similar. O balanço de volume residual gerado também se mostrou bastante adequado para a área uma vez que gerou valores, para a maior parte da área, próximos de zero, evidenciando que o balanço de água está correto.

Os rasters que combinados descrevem o campo de fluxo da água subterrânea mostraram-se adequados também, pois o resultado evidencia vetores direcionados partindo de regiões mais elevadas para regiões mais baixas, além de possuir maior magnitude em locais com maior gradiente hidráulico. Como foi realizado um estudo em aquífero livre a carga piezométrica pode ser desprezada e, portanto a carga hidráulica total será devida apenas a cota altimétrica, ou seja, a carga hidráulica total tende a acompanhar a topografia do terreno.

Os resultados das ferramentas *Particle Track* e *Porous Puff* mostraram-se bastante úteis para assistir decisões de medidas de tratamento de contaminantes no caso de um acidente com dispersão de algum poluente no meio, pois a delimitação das plumas em diferentes tempos permite prever seu comportamento, bem como sua área de influência. Neste caso, após 3 anos, uma faixa de, aproximadamente, 430 m seria ocupada pela pluma que sai do ponto 1, a uma distância de 350 m entre o ponto 1 e o centro da pluma. Com essas informações, associadas a outras informações de interesse é possível optar dentre as diversas opções para tratamento do poluente como barreiras reativas permeáveis ou bombeamento para tratamento *ex situ*, por exemplo.

Com base no conhecimento adquirido sobre o funcionamento dessas ferramentas será possível desenvolver e aplicar modelos para subsidiar a análise de processos da dinâmica subterrânea de

grande importância ambiental, como movimentação de água e dispersão de poluentes. Tal resultado pode servir como base para estudos de gestão da área de interesse.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP pelo suporte financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

### REFERÊNCIAS

- Bear, J. *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Dover Publications, 1972, 764 p.
- ESRI (Environmental Systems Resource Institute). *ArcMap 9.1*. Redlands, California. 2010.
- Feitosa, F. A. C. & MANOEL FILHO, J. *Hidrogeologia Conceitos e Aplicações*. 2ª Edição. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. 391p.
- Freeze, R.A. & Cherry, J.A. *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ. Prentice-Hall, Inc., 1979, 604 p.
- Marsily, G. *Quantitative Hydrogeology*. Academic Press. 1986.
- Monteiro, A. B. et al. *Hidrogeologia e Gestão do Aquífero Barreiras nos Bairros de Ibura e Jordão - Recife - Pernambuco*. Trabalho apresentado ao XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Florianópolis, 2002.
- Teixeira, W.; Toledo, M.C.M.; Fairchild, T. R.; Taioli, F. *Decifrando a Terra*. São Paulo. Oficina de Textos, 2003. 557p.
- Todd, D.K. *Groundwater hydrology*. Nova York: Wiley, 1959. 336p.
- Tressoldi, M. & Consoni, A.J. Disposição de resíduos. In: Antônio Manoel dos Santos Oliveira e Sérgio Nertan Alves de Brito (Org.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo. 1994. P. 361-380.