

## 7 Conclusões e Sugestões

Neste documento foram apresentados os resultados da pesquisa de doutorado realizada sobre o tema de transporte de vírus nos meios geológicos. As motivações para a realização desta pesquisa foram: a necessidade de analisar o potencial de contaminação das captações de água para consumo humano por causa das águas residuais domésticas geradas em sistemas de tratamento por tanque séptico; a consideração dos fenômenos reais envolvidos no transporte destes microorganismos; e a aplicação destes conhecimentos na análise de casos representativos da estratigrafia do Vale Central da Costa Rica.

### 7.1. Conclusões

Os materiais geológicos contêm vazios dentro da sua estrutura. Quando estes vazios são espaços que separam pedaços da formação geológica, se diz que o vazio constitui uma fissura ou uma fratura; quando esses vazios são espaços que separam grãos da formação ou se estão localizados dentro dos grãos, se diz que o material apresenta poros. Quando os materiais geológicos acumulam e transmitem água em quantidade suficiente para ser aproveitada pelo homem, se diz que existe um aquífero. Se a água no aquífero estiver sob pressão hidrostática o aquífero é classificado do tipo livre. Se a água estiver sob uma pressão maior à pressão hidrostática o aquífero é classificado do tipo confinado. Os aquíferos então, podem ser classificados em aquíferos porosos ou fraturados e em aquíferos livres ou confinados. Em alguns tipos de materiais, especialmente nos vulcânicos e sedimentares, é possível a presença concomitante de poros e fraturas, pelo que são chamados de fraturados-porosos.

O fluxo e transporte de qualquer substância através do terreno podem ser descritos a partir de modelos conceituais ou de modelos matemáticos. O modelo conceitual é a explicação em forma de palavras e desenhos sobre o comportamento físico do sistema. O modelo matemático é aquele que representa o

comportamento do sistema através de equações. Os materiais geológicos podem ser descritos como porosos, fraturados ou fraturados-porosos. Para cada um destes tipos de materiais, têm sido propostos modelos conceituais para descrever o fluxo e o transporte. Esses modelos são: Contínuo Equivalente, Contínuo Equivalente de Porosidade Composta, Contínuo Equivalente de Dupla porosidade e Permeabilidade Simples, Contínuo Equivalente de Dupla Porosidade e Dupla Permeabilidade, Descontínuo com Fraturas Discretas e Descontínuo Fraturado-Poroso. O termo contínuo refere-se à descrição do comportamento do meio como um todo. O termo descontínuo refere-se à descrição do comportamento de cada uma das partes do sistema de maneira independente, neste caso os poros e as fraturas. Para cada modelo conceitual existe um modelo matemático associado. Neste trabalho de pesquisa, os meios foram modelados como descontínuos fraturados-porosos, onde as contribuições de cada fratura e de cada uma das matrizes porosas foram consideradas de maneira explícita e independente.

Um vírus é um agente infeccioso que precisa de uma célula para se multiplicar. Quando exposto ao ambiente, a sua capacidade de infeccionar (entrar na célula) é diminuída ou anulada, é dito então que o vírus foi inativado. O tempo de sobrevivência dos vírus é definido como o tempo necessário para sua inativação. São vários os fatores que influenciam na sobrevivência e no transporte dos vírus nos meios geológicos, pelo que a tarefa de simular esses processos é realmente um desafio. O volume de conhecimento nesta área tem aumentado nos últimos anos de maneira acentuada, o que tem permitido a definição de modelos matemáticos bastante precisos para descrever o comportamento destes microorganismos durante o transporte através dos meios geológicos. Conceitualmente, o transporte dos vírus é descrito pelos mesmos modelos conceituais acima mencionados. Os processos físicos até agora reconhecidos como atuantes durante o transporte dos vírus são: advecção, dispersão, decaimento, sorção dinâmica nas interfaces água-ar e água-sólido, filtração mecânica e exclusão de poros. A advecção e a dispersão apenas atenuam a concentração, os outros processos removem efetivamente os vírus. Interessante é o comportamento dos vírus sob os efeitos da exclusão, porque neste caso podem ser deslocados a distâncias maiores que os solutos conservativos, o que implica um risco maior para as populações. Em virtude do seu tamanho, os vírus também são modelados como partículas coloidais.

Foi constatado a partir da revisão da bibliografia nacional e internacional, que existem modelos numéricos baseados no Método dos Elementos Finitos para simular o fluxo e o transporte de solutos conservativos em sistemas tridimensionais em regime de saturação variável constituídos por fraturas e matrizes porosas. Os resultados das aplicações destes modelos numéricos demonstram que é possível acoplar o fluxo e o transporte das fraturas e dos poros a partir do emprego do modelo conceitual do meio fraturado-poroso.

Foi constatado também que o Método dos Volumes Finitos (MVF) tem sido empregado para discretizar às equações de fluxo e transporte para meios idealizados como fraturados-porosos com resultados satisfatórios. Os modelos referidos têm sido desenvolvidos para problemas de fluxo tridimensional e para problemas bidimensionais de fluxo acoplado com transporte de colóides ou solutos conservativos. Não foram encontradas publicações com o desenvolvimento da formulação fraturada-porosa através do MVF, para modelos tridimensionais acoplados de fluxo e transporte de vírus. Por isto, foi proposto como objetivo geral da pesquisa:

*A construção de um modelo numérico tridimensional para o transporte de vírus em meios idealizados como fraturados-porosos sob condições de saturação variável, para ser incorporado numa nova metodologia (baseada no risco) de avaliação do potencial de contaminação das captações de água subterrânea por vírus provenientes de tanques sépticos.*

Para atingir esse objetivo, foi desenvolvido nesta tese um programa de análise denominado VirTran-3D com a capacidade de simular as seguintes condições:

- Fluxo bidimensional e tridimensional em meios porosos em regime de saturação variável
- Fluxo bidimensional para fraturas com orientação qualquer em regime de saturação variável
- Transporte bidimensional e tridimensional de vírus em meios porosos em regime de saturação variável.
- Transporte bidimensional de vírus em fraturas com orientação qualquer em regime de saturação variável.

- Fluxo e transporte de vírus para sistemas tridimensionais acoplados de fraturas e matrizes porosas.

O programa desenvolvido tem a capacidade de incorporar as seguintes condições de contorno:

- Para o problema de fluxo: Condições de Dirichlet, Neuman e Face Livre.
- Para o problema de transporte: Condições de Dirichlet, Neuman, Cauchy e Gradiente Nulo.

A discretização numérica das equações de transporte de vírus para meios fraturados-porosos, e o programa VirTran-3D, constituem um aporte real desta tese para esta área do conhecimento.

A avaliação do potencial de contaminação de captações de água, por causa das águas residuais provenientes dos sistemas de tanque séptico, é feita a partir da definição de uma distância de separação mínima que deve existir entre a captação e o local de infiltração do efluente. A determinação dessa distância define a zona de proteção da captação. Existem três metodologias para a definição do tamanho destas zonas de proteção:

- Metodologias baseadas em distâncias fixas e tempos de trânsito.
- Metodologias baseadas na vulnerabilidade.
- Metodologias baseadas no risco de infecção.

No caso da Costa Rica, as avaliações do potencial de contaminação, são feitas através do uso de uma metodologia baseada no tempo de trânsito, metodologia que foi denominada nesta tese como Método de Transporte Advectivo (MTAv). O tempo de trânsito empregado neste método corresponde ao tempo de sobrevivência dos vírus. Nesta análise determina-se a distância máxima percorrida pelos vírus durante esse tempo. Essa distância define a separação mínima que deve existir entre a captação e o sistema de tratamento.

Neste método, considera-se que o transporte ocorre por percolação vertical saturada através da zona não saturada, e por transporte ao longo da interface água-ar na zona saturada segundo o gradiente natural. Este método apenas considera

transporte advectivo, e não considera os outros processos acima mencionados como atuantes durante o transporte dos vírus. Com o objetivo de incluir esses fenômenos na análise de casos para o Vale Central da Costa Rica, foi aplicado o programa VirTran-3D no estudo de três geometrias tipo representativas das condições estratigráficas de algumas áreas do Vale Central. Os resultados obtidos com estas análises foram comparados com os resultados obtidos com o MTAv. Esta comparação permitiu definir (para aos exemplos analisados) que:

- O MTAv pôde prever de maneira correta a chegada dos vírus ao nível da água dependendo principalmente da espessura da zona não saturada e dos parâmetros de transporte, mas, em geral se apresentou como muito conservador para prever essa chegada.
- O MTAv se mostrou inadequado para definir as distâncias horizontais percorridas pelos vírus, pois dependendo das condições de campo, os resultados foram conservadores ou muito liberais. Isto é de especial importância porque é essa distância horizontal a que define a distância de separação mínima que deve existir entre o sistema de tratamento e as captações vizinhas.
- O MTAv não previu a possibilidade de contaminação vertical do aquífero. Este pode ser um mecanismo importante de contaminação entre aquíferos comunicados.

Devido ao caráter aproximado dos parâmetros e concentrações empregados para simular as condições de transporte e fluxo não saturado nos materiais do Vale Central, não foi possível generalizar as conclusões anteriores para casos reais de campo. Isto não significa que as observações anteriores não sejam fisicamente válidas para as condições de campo no Vale Central, mas significa que é necessário verificar a intensidade dos efeitos observados a partir do emprego de parâmetros específicos dos materiais daqueles locais. É necessário verificar a possibilidade de que os resultados do MTAv mostrem o mesmo comportamento observado nos exemplos analisados nesta tese. Deve ser lembrado que nos exemplos aqui analisados, apesar de serem hipotéticos, foram empregados parâmetros reais embora não necessariamente representativos das condições locais

da Costa Rica. Os resultados anteriores reforçam a idéia de se realizarem análises deste tipo para as condições de campo.

A importância de se realizarem análises mais realistas para condições de campo radica na possibilidade do MTA<sub>v</sub> fornecer resultados conservadores, o que acarretaria o não licenciamento ambiental em projetos que não representam risco para as captações, ou na possibilidade do MTA<sub>v</sub> fornecer resultados liberais no transporte horizontal na zona não saturada, o que pode permitir o licenciamento ambiental de projetos que sim representam risco para as captações vizinhas.

## 7.2. Sugestões

*Sugestões de temas de pesquisa para continuar com o desenvolvimento do tema desta tese:*

- Estudar o problema de fluxo e transporte a partir da Teoria de Fluxo Laminar.
- Desenvolver procedimentos de laboratório para a determinação dos parâmetros de transporte de vírus.
- Analisar a possibilidade de se definir um critério de concentração máxima permissível para as condições da Costa Rica, isto com o intuito de oferecer aos consultores a possibilidade de utilizar o Método Baseado no Risco como alternativa para a realização das análises de potencial de contaminação por águas residuais.

*Sugestões para melhorar o desempenho do programa VirTran-3D:*

- Programar uma rotina para incorporar o passo dinâmico do tempo.
- Programar uma rotina para incorporar o método do Gradiente Biconjugado na solução do sistema de equações para o problema de transporte.
- Programar uma rotina para simular o fluxo não saturado na fratura com o modelo Brooks e Corey.

- Estudar a possibilidade de resolver os problemas de fluxo e transporte a partir de outros esquemas iterativos como os métodos Newton-Raphson e BFGS.

*Sugestões para complementar as análises de transporte de vírus nos materiais do Vale Central da Costa Rica:*

- Realizar uma análise de sensibilidade para as geometrias estudadas nesta tese, considerando a variação nas condições de saturação e especialmente a variabilidade dos parâmetros de transporte. Nesta análise pode-se analisar também o efeito do bombeamento em poços próximos.
- Realizar uma análise de campo para um ou vários locais do Vale Central e comparar os resultados do MTAv com os resultados do programa VirTran-3D. Para isto seria necessária a realização de ensaios de transporte para definir as propriedades reais dos materiais.