

# 1 Apresentação

São apresentadas a seguir: a motivação para a escolha do tema da investigação, a metodologia de trabalho e a descrição do conteúdo deste documento.

## 1.1. Motivação

Como parte do procedimento de licenciamento ambiental de qualquer obra civil é necessária a avaliação dos possíveis impactos sobre os elementos ambientais com os quais a obra virá ou poderá vir interagir. Na Costa Rica, onde uma boa parte da água para consumo humano é obtida através de captações de águas subterrâneas, é sempre necessário avaliar os possíveis impactos dos projetos civis sobre essas fontes de água. De especial interesse são os projetos urbanísticos habitacionais onde são geradas águas residuais de maneira contínua e prolongada. Essas águas residuais podem conter substâncias químicas e organismos patogênicos nocivos para a saúde.

Na Costa Rica todo projeto urbanístico deve avaliar o potencial de contaminação das fontes de água para consumo humano, por causa dos possíveis organismos patogênicos presentes nas águas residuais nele geradas. O procedimento de avaliação empregado na Costa Rica consiste na verificação da distância máxima percorrida pelos organismos a partir da fonte de injeção durante um tempo predeterminado. Essa distância máxima é conhecida como distância de separação e dentro dela não deve existir nenhum sistema de captação de água. O valor do tempo empregado na análise é chamado de tempo de trânsito, e é definido como o tempo para o qual é prevista a inativação de todos os organismos injetados no terreno. A distância de separação é calculada a partir do transporte advectivo dos vírus na condição saturada. Esse procedimento de cálculo é denominado neste documento como Método de Transporte Advectivo (MTAv).

Na prática profissional, o autor deste trabalho teve a oportunidade de participar de diversos projetos em diferentes regiões da Costa Rica. Em muitas ocasiões resultava claro que a modelagem feita com o MTAv não representava as condições encontradas no local, como a presença de fraturas e a não saturação do terreno, condições comuns na maior parte do território da Costa Rica. Além disso o MTAv não incorpora o efeito de outros mecanismos normalmente relacionados com o transporte de poluentes como a dispersão e a sorção em equilíbrio, e também não considera outros mecanismos de transporte (que antes do início desta pesquisa não eram conhecidos pelo autor como mecanismos importantes no transporte dos patógenos e que viriam a ser descobertos durante a mesma), como a sorção dinâmica nas superfícies dos sólidos e na interface água-ar, a filtração mecânica e a exclusão de poros. (A sorção dinâmica acontece quando as taxas de adsorção e desorção não estão equilibradas. Ao longo deste trabalho o nome sorção dinâmica será empregado para representar sorção nas superfícies sólidas).

Devido ao impacto direto nas economias das pessoas e dos projetos, é importante que na determinação das distâncias de separação sejam consideradas as condições reais de fluxo e de transporte. Devido a essa importância, surgiu como iniciativa do autor a possibilidade de pesquisar formalmente sobre o assunto com o intuito de entender os mecanismos envolvidos no transporte dos patógenos, desenvolver uma metodologia que incorporasse esses mecanismos para ser aplicada nas condições da Costa Rica, e comparar os resultados assim obtidos com aqueles dados pelo MTAv.

## **1.2. Metodologia de Trabalho**

O desenvolvimento desta pesquisa incluiu diferentes etapas. Inicialmente, foi feita uma revisão geral da literatura nacional e internacional sobre o tema, com o objetivo de reconhecer os fenômenos envolvidos no transporte dos patógenos e também com o objetivo de verificar as ferramentas disponíveis na PUC-Rio para o desenvolvimento de uma metodologia que incorporasse esses fenômenos. A partir dessa revisão inicial foram definidos os objetivos gerais e específicos da pesquisa (apresentados no Capítulo 2), e também foi definida a proposta formal da tese de doutorado. Após esta revisão bibliográfica foi decidido tratar apenas do transporte

de vírus, principalmente por causa do tempo disponível para a pesquisa. A metodologia desenvolvida, no entanto, poderia (com poucas modificações) simular o transporte de outros microrganismos como bactérias, protozoários e ovos de helmintos. A revisão da bibliografia foi uma atividade contínua durante o tempo de pesquisa.

A partir desta revisão bibliográfica foram obtidas as equações diferenciais que descrevem o fluxo e o transporte de vírus na fratura e no meio poroso. Essas equações foram discretizadas através do Método dos Volumes Finitos (MVF) para posteriormente serem incorporadas num código de programação. A discretização foi feita com o MVF porque a conservação é garantida no volume de integração, propriedade importante se tratando do transporte de massa. A utilização do MVF respondeu também ao fato de não se ter experiência no Departamento de Engenharia Civil no desenvolvimento de ferramentas de grande porte baseadas nesse método. Isto permitiria comparar o desempenho do MVF com o desempenho das outras ferramentas de grande porte já desenvolvidas e baseadas na discretização pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Esta etapa de discretização das equações do problema consumiu alguns meses de trabalho enquanto o MVF era plenamente compreendido. No total foram discretizados cinco sistemas de equações:

- Sistema para simular o fluxo numa fratura
- Sistema para simular o fluxo na matriz porosa
- Sistema para simular o transporte de vírus na fratura
- Sistema para simular o transporte de vírus na matriz porosa
- Sistema para simular as concentrações sorvidas de vírus nas fraturas e na matriz porosa

A partir da revisão das diferentes ferramentas computacionais disponíveis na PUC-Rio para a simulação do fluxo e transporte de solutos, decidiu-se por motivos técnicos, programar as equações discretizadas num código independente dos módulos já existentes. Todas as rotinas de análise para este código foram desenvolvidas integralmente pelo autor deste trabalho, a exceção da rotina de impressão dos resultados para o processador gráfico POS3D, que foi modificada do trabalho de Telles (2006). O código foi implementado na linguagem FORTRAN 90 num programa modulado com mais de 6000 linhas em 70 sub-

rotinas. A programação desse código e os posteriores testes de validação da resposta numérica consumiram a maior parte do tempo da pesquisa e se estenderam além do tempo previsto.

Como referido na motivação, a idéia principal desta pesquisa é a de aplicar uma nova metodologia de análise às condições de fluxo e transporte reais da Costa Rica. Foi considerada inicialmente dentro do escopo da pesquisa, a realização de trabalhos de campo num local específico do “Valle Central da Costa Rica” (doravante denominado Vale Central). Porém, devido ao consumo inesperado do tempo durante a fase de programação e ao prazo imposto pelo programa de Doutorado, o escopo desta aplicação foi alterado. Foram definidas então três Geometrias Tipo representativas da estratigrafia de algumas áreas do Vale Central. As condições de fluxo nesses locais foram definidas a partir dos dados disponíveis pelo autor de consultorias nas quais teve participação. Os parâmetros de transporte dos vírus foram obtidos da literatura. A metodologia desenvolvida nesta pesquisa foi então aplicada na análise dessas três Geometrias Tipo e os resultados comparados como os obtidos com o MTAv. Embora os valores numéricos absolutos obtidos nesta análise não representem fielmente as condições reais de transporte no Vale Central, é possível de forma comparativa analisar a influência dos mecanismos não incorporados no MTAv na distribuição dos vírus no terreno e portanto nas distâncias máximas percorridas.

### **1.3. Estrutura do Documento**

O documento foi estruturado em oito capítulos, oito apêndices e um anexo. O conteúdo de cada uma destas partes é descrito a seguir.

Capítulo 2. Neste capítulo é feita uma introdução ao tema da pesquisa e são revisados os modelos conceituais para o fluxo e transporte em meios fraturados e porosos. A revisão bibliográfica da literatura internacional e nacional é também apresentada. Neste capítulo ainda são colocados os objetivos que nortearam este trabalho.

Capítulo 3. Neste capítulo são descritos os diferentes fenômenos ou mecanismos físicos até agora reconhecidos na literatura especializada como os fatores que controlam o transporte dos vírus através dos materiais geológicos. Uma breve introdução aos vírus é também apresentada junto ao conceito de tempo de sobrevivência.

Capítulo 4. São apresentadas neste capítulo as equações governantes do problema, a discretização resultante da aplicação do MVF e uma descrição geral das rotinas do código de programação desenvolvido.

Capítulo 5. Neste capítulo são mostradas as verificações numéricas dos resultados obtidos com o programa desenvolvido.

Capítulo 6. Neste capítulo é feita uma aplicação da metodologia desenvolvida na análise do transporte dos vírus em três geometrias do Vale Central. A comparação com os resultados do MTA<sub>v</sub> é também apresentada.

Capítulo 7. São apresentadas as conclusões e sugestões.

Capítulo 8. Neste capítulo é mostrada a lista das referências bibliográficas citadas no documento.

As informações dos capítulos acima referidos foram complementadas e ampliadas em oito apêndices e um anexo. Os apêndices foram redigidos de maneira tal que cada um deles pode ser consultado de forma independente. Cada apêndice constitui um documento técnico sobre cada tema abordado. A informação colocada nos apêndices é parte integral do trabalho desenvolvido nesta pesquisa e foi colocada nos apêndices para premiar o foco principal da tese que é o de entender os mecanismos do transporte e especialmente a aplicação destes mecanismos na análise de casos na Costa Rica. O conteúdo de cada apêndice é descrito a seguir.

- Apêndice A. São mostradas as deduções das equações de continuidade governantes do problema.
- Apêndice B. Neste apêndice é descrito o Método dos Volumes Finitos (MVF).
- Apêndice C. Neste apêndice é mostrada a discretização da equação que descreve o fluxo na matriz porosa.
- Apêndice D. Neste apêndice é mostrada a discretização da equação que descreve o fluxo na fratura.
- Apêndice E. Neste apêndice é mostrada a discretização da equação que descreve o transporte dos vírus na matriz porosa.
- Apêndice F. Neste apêndice é mostrada a discretização da equação que descreve o transporte dos vírus na fratura.
- Apêndice G. Neste apêndice é mostrada a discretização das equações que descrevem as concentrações nas fases sorvidas e filtradas tanto na fratura quanto na matriz.
- Apêndice H. Neste apêndice é descrita a função de interpolação exponencial empregada para aproximar o termo advectivo na equação de transporte.
- Anexo 1. Neste anexo são apresentadas as soluções analíticas utilizadas na validação numérica dos resultados.