

1 Introdução

O clima úmido brasileiro propicia uma das mais densas redes hidrográficas do planeta, com rios de grande volume, predominantemente perenes, com exceção de alguns rios no sertão nordestino, que secam por alguns meses. No entanto, uma grande parcela da água em estado líquido encontra-se armazenadas na matriz porosa dos solos ou nas fissuras das rochas, dificultado sua utilização.

A realização de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas vem da necessidade de se compreender o funcionamento do balanço hídrico, ou seja, os processos que controlam o movimento da água e os impactos de mudanças do uso da terra sobre a quantidade e qualidade das águas (Whitehead *et al.*, 1993).

Os processos físicos que controlam a distribuição e o movimento de água são melhores compreendidos se forem descritos através do ciclo hidrológico. Este ciclo pode ser dividido nas seguintes etapas: precipitação, interceptação, infiltração, escoamento superficial, escoamento subterrâneo, transpiração e evaporação. A descrição destas etapas é amplamente abordada na literatura e formam um conjunto complexo de variáveis.

Os modelos hidrológicos, ou representações matemáticas do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parcela da superfície e/ou subsuperfície terrestre, podem ser classificados sobre diferentes aspectos. Comumente, os modelos podem ser classificados de acordo com o tipo de variável utilizada (estocástico ou determinístico), tipo de relações entre as variáveis (empírico ou baseado em processos), forma de relações espaciais (pontual ou distribuído) e a existência de dependência temporal (transiente ou não) (Rennó *et al.*, 2000).

O foco deste trabalho está baseado na modelagem hidrológica determinística, distribuída e transiente, englobando as etapas do ciclo hidrológico de precipitação, infiltração, escoamento superficial e escoamento subterrâneo, considerando a precipitação um parâmetro de entrada.

A interpretação do ciclo hidrológico sugere que os fluxos entre as etapas (comumente chamadas de sistemas neste trabalho), estejam interligados de forma que, os processos aconteçam simultaneamente e a resposta de um seja o

estímulo de outro, dado um evento. Este evento pode ser precipitação, percolação solo-superfície, infiltração ou fluxo imposto.

O modelo proposto resolve numericamente, através do método dos elementos finitos, as equações bidimensionais simplificadas e comumente conhecidas por equações de Saint-Venant nas formas cinemática e de difusão, acoplando-as com o modelo numérico modificado SWMS3D (Simunek *et al.*, 1995) que resolve a equação de Richards 3D para a solução do escoamento em meios porosos. A representação de uma bacia hidrográfica, através deste modelo, fica restrita às condições de simplificações dos modelos de escoamento superficial, assim como, pelo aumento do tempo de processamento, resultante de um número elevado de nós na malha ou pela redução do passo de tempo do SWMS3D modificado, requerendo um tempo de processamento maior que o tempo real do fenômeno natural.

A literatura na área de escoamento superficial é muito vasta, dando destaque ao trabalho de Taylor *et al.* (1974), que apresentaram o método dos elementos finitos para a equação da continuidade e da quantidade de movimento, numa análise bidimensional em bacias hidrográficas ou canais. Ross *et al.* (1982), empregaram o método de Galerkin para a equação unidimensional da onda cinemática, representando a bacia hidrográfica através de planos e canais. Goodrich *et al.* (1991), implementaram o modelo da onda cinemática através do método dos elementos finitos, para uma malha de triângulos irregulares. Jaber *et al.* (2003) utilizaram o método dos elementos finitos para resolver o modelo da onda cinemática 1D, discutindo em seu trabalho o valor do passo de tempo empregado, assim como a aplicação da variabilidade espacial das propriedades físicas da bacia e da acurácia dos resultados obtidos. Posteriormente, estes mesmos autores desenvolveram o modelo bi-dimensional da onda cinemática, implementando o Lumped na matriz de massa, além das variabilidades espaciais das propriedades físicas da bacia, assim como uma formulação para o passo de tempo dinâmico diferente da proposta por Courant *et al.* (1956). Liu *et al.* (2003) apresentaram a importância das microravinas no escoamento superficial bidimensional, as quais geram caminhos preferenciais de escoamento. Para o cálculo da infiltração, estes autores, implementaram o método de Green-Ampt.

Com enfoque nos trabalhos que utilizaram o modelo hidrológico difusivo (MHD) para escoamento superficial, cabe referenciar Akan *et al.* (1981) que apresentaram a solução por diferenças finitas do modelo de difusão para uma rede de canais abertos (modelo unidimensional). Hromadka *et al.* (1985),

utilizaram o método de diferenças finitas na equação 2D para o estudo de rompimento de barragens. Gottardi *et al.* (1993), implementaram o método de controle de volume - elementos finitos (CVFE) para a equação 2D, Giammarco *et al.* (1996), compararam o método CVFE com os métodos de elementos finitos e diferenças finitas, Gottardi *et al.* (1996), apresentam um programa computacional para solução bidimensional de fluxo superficial com solução por elementos finitos (FE) ou CVFE. Lal A. M. (1998), comparou o desempenho de três formulações diferentes de diferenças finitas para a equação 2D.

Os métodos de diferenças finitas, volume de controle ou CVFE apresentados nos trabalhos acima, não serão abordados neste trabalho, sendo citados apenas como ilustração da evolução e da diversidade de trabalhos na área de escoamentos superficiais, que adotam os modelos cinemáticos e difusivos.

O desenvolvimento de modelos numéricos de escoamentos superficial e subterrâneo, de forma independente, vem sendo feito há décadas. Contudo, os trabalhos de acoplamento são mais recentes, nos quais se discutem formas de acoplamento, como modelos matemáticos e numéricos adotados. Dentre os trabalhos publicados nesta área, pode-se citar Gandolfi *et al.* (2000) que apresentaram um modelo de acoplamento entre escoamento superficial bidimensional e a equação unidimensional de Richards. Fiedler *et al.* (2000), apresentaram um modelo acoplado de escoamento bidimensional com a equação de Gren-Ampt para o cálculo da infiltração. Estes autores resolveram às equações completas de Saint-Venant para escoamento superficial, baseados no esquema de diferenças finitas de MacCormak. Panday *et al.* (2004), utilizaram à equação de escoamento superficial de difusão (resolução pelo método dos volumes finitos), para uma rede de rios e canais, acoplada com um modelo tridimensional de escoamento em meios porosos, saturado/não saturado. Kollet *et al.* (2006), formularam um modelo excluindo o conceito de condutância entre os domínios, acoplado o modelo bidimensional cinemático, com a equação tridimensional saturada /não saturada de Richards.

Dada à tendência de tratar os processos hidrológicos de forma integrada, órgãos públicos ou algumas empresas da área, já disponibilizam softwares que simulam as fases de escoamento superficial e subterrâneo de modo acoplado. A tabela 1.1, mostra uma relação dos principais softwares encontrados.

Modelo	Desenvolvedor	Ano	Características
MIKE SHE	DHI Water & Environment	2003	Solução da equação de Richards 3D e do modelo difusivo 2D utilizando diferenças finitas.
Duflow & MicroFem	Smits & Hemker	2004	Solução da equação de Richards 3D e do modelo difusivo por elementos finitos.
WEPP	USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory	1995	Modelo para cálculo de erosão, utilizando o modelo modificado de Green-Ampt para infiltração e o modelo cinemático para escoamento superficial.
MODBRANCH	USGS	1996	Acoplamento do modelo 3D em diferenças finitas MODFLOW-96 e do modelo de escoamento em rede de canais unidimensional cinemático BRANCH.

Tabela 1.1 - Softwares que retratam as fases de escoamento superficial e subterrâneo de modo acoplado.

1.1. Escopo

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos. O capítulo 2 trata das formulações matemáticas dos fluxos superficiais e subterrâneos, apresentando as equações governantes, assim como, os principais aspectos de suas deduções e a solução analítica para o modelo cinemático unidimensional, utilizado para validação dos modelos numéricos desenvolvidos.

O capítulo 3 descreve a implementação do método numérico utilizado para solução das equações governantes.

O capítulo 4 aborda a descrição dos algoritmos e rotinas desenvolvidas para o acoplamento numérico das equações.

O capítulo 5 apresenta os exemplos de validação dos modelos numéricos, assim como, exemplos de aplicabilidade do modelo acoplado e superficial desenvolvidos.

O capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho.

1.2. Objetivo

Este trabalho busca desenvolver uma rotina de acoplamento entre as soluções numéricas da equação de Richards 3D (fluxo em meios poros) e dos modelos de escoamento superficial cinemático e de difusão. Desta forma, será obtida uma formulação numérica capaz de representar as interações entre os fluxos superficiais e subterrâneos, dadas as condicionantes de modelagem.