



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15679-TDI/1453

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DINÂMICA
DISTRIBUÍDA PARA ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL EM UMA MICROBACIA URBANA**

Leonardo Marini Pereira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Camilo Daleles Rennó e Leila Maria Garcia Fonseca, aprovada
em 04 de dezembro de 2008.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/11.10.00.06>>

INPE
São José dos Campos
2009

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15679-TDI/1453

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DINÂMICA
DISTRIBUÍDA PARA ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL EM UMA MICROBACIA URBANA**

Leonardo Marini Pereira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Camilo Daleles Rennó e Leila Maria Garcia Fonseca, aprovada
em 04 de dezembro de 2008.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/11.10.00.06>>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Pereira, Leonardo Marini .

P414m Modelagem hidrológica dinâmica distribuída para estimativa do escoamento superficial em uma microbacia urbana / Leonardo Marini Pereira . – São José dos Campos : INPE, 2009.
90p. ; (INPE-15679-TDI/1453)

Dissertação (Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

Orientadores : Drs. Camilo Daleles Rennó e Leila Maria Garcia Fonseca.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Modelagem hidrológica. 3. Escoamento superficial. 4. Modelo distribuído. 5. Terrame. I.Título.

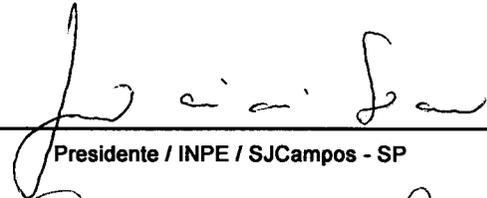
CDU 528.711.7

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, microfilmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

**Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto**

Dr. João Vianei Soares



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Camilo Daleles Rennó



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Leila Maria Garcia Fonseca



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Claudia Maria de Almeida



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Tiago Garcia de Senna Carneiro



Convidado(a) / UFOP / Ouro Preto - MG

Aluno (a): Leonardo Marini Pereira

São José dos Campos, 04 de dezembro de 2008

“Para dar ordens à natureza, é preciso saber obedecê-la”.

Francis Bacon

A meu pai, APARECIDO DE OLIVEIRA PEREIRA.

AGRADECIMENTOS

É impossível, para uma única pessoa, o desenvolvimento de um trabalho científico. A começar pela própria metodologia científica, na qual há a necessidade de fundamentar-se e aprender com os trabalhos realizados por outras pessoas. O próprio Isaac Newton admite ter enxergado mais longe porque subiu nos ombros de gigantes. Sob outro ponto de vista, existem pessoas que nos auxiliam tecnicamente, na prática, com uma dica, uma pequena solução para um grande problema e ainda, nos momentos tão necessários de descontração e lazer, fundamentais para o bom funcionamento da mente. Existem ainda aqueles que nos incentivam, nos motivam e nos apóiam desde os melhores até os piores momentos. A todo esse conjunto de pessoas, fundamentais para a realização deste trabalho, manifesto o meu profundo agradecimento.

Agradeço aos orientadores por me nortear e me conduzirem até aqui. Agradeço a paciência para ensinar e a motivação do Camilo para a exaustiva “caça aos bugs”. Agradeço ao Laércio pelos primeiros passos no TerraME e principalmente ao Pedro Ribeiro de Andrade e ao Sérgio Costa pelas dicas fundamentais do TerraME, sem as quais este trabalho jamais seria realizado por mim. Ao pessoal da CPRM do Rio, Daniel e Lígia, expresso aqui minha gratidão pela boa vontade, presteza e atenção na concessão dos dados. Ao professor Edgard, pela sólida base de redação e senso crítico me oferecida ainda no colégio, que levarei por toda a minha existência. Aos professores da pós-graduação, pelo precioso conhecimento compartilhado, que fazem do INPE, um Instituto de excelência, no qual sempre terei orgulho de ter estudado. Aos meus companheiros da senzala, Fer, Grazi, Eliana, Érica, Flávia, Orlando, Alê e Rogério pela descontração e ajuda no saudoso período que lá fiquei. Aos colegas de turma por dividirem bons momentos de aprendizagem, interdisciplinaridade, desafios e humor.

Sou grato de modo especial às pessoas que me deram equilíbrio e alegria durante o período do mestrado. À Barbara pelo carinho e belo sorriso que me enchem de coragem. Barbara, que neste período, me ajudou a descobrir a beleza da cerveja, cujo papel sempre foi trazer empolgação e alegria para a humanidade. Agradeço a meus pais, Cido

e Rosa pelo apoio incondicional e pela formação do meu caráter de homem e cidadão. Minha mãe pela torcida e preocupação e meu pai, a quem dedico este trabalho, pelo eterno apoio à prazerosa atividade de aprender e pesquisar. Ao Magnífico Senhor Banzo pelos sábios ensinamentos. Ao Christopher pelo companheirismo e à Denise, minha querida irmã, por me ensinar que temos a obrigação de sermos a superação dos nossos antepassados. Aos meus queridos amigos, Rodrigo Quirino, Izi e Laura, por me proporcionarem momentos de “vida” em Belo Horizonte e no Rio de Janeiro durante a empreitada de desenvolver uma dissertação de mestrado e trabalhar ao mesmo tempo.

Muitas páginas seriam necessárias para expressar na íntegra, a importância que teve cada pessoa aqui citada, além de muitas outras, para a realização deste trabalho. Restrinjo-me, contudo, a apenas algumas linhas para externar a todos, os meus profundos e sinceros agradecimentos.

RESUMO

As enchentes e inundações são sérios problemas nas cidades brasileiras decorrentes da inadequada impermeabilização do solo pelo processo de urbanização. O solo impermeável diminui ou impossibilita a infiltração de água causando um grande aumento do escoamento superficial. Em vista deste cenário, o presente trabalho tem como objetivo aplicar um modelo hidrológico dinâmico distribuído a fim de estimar o escoamento superficial em uma microbacia urbana. A área teste para a aplicação do modelo é uma bacia hidrográfica de 47,54 km², localizada na cidade de Petrópolis, região serrana do estado do Rio de Janeiro. O modelo hidrológico proposto utiliza o método de Curva Número do SCS para a estimativa do escoamento superficial. A plataforma utilizada na implementação foi o *framework TerraME*. Esta ferramenta executa rotinas de modelagem dinâmica espacial sobre uma estrutura de células, chamada espaço celular, sobre a qual é discretizada a área de interesse. Os valores dos parâmetros para a aplicação do modelo foram calibrados por um processo de otimização com dados de três estações distribuídas pela bacia, que coletam medidas de precipitação e cotas linimétricas. Após a calibração, fez-se a validação do processo, no qual foi observado um bom ajuste das vazões simuladas com as variações do nível da água. Nos dados disponíveis, não se dispunha da conversão de cotas linimétricas para vazão e, por este motivo, a análise deu-se apenas na verificação do padrão de variação entre as vazões calculadas e as medidas de nível. Para a implementação do modelo, criou-se uma rotina com base nos sentidos de fluxo obtidos com o algoritmo D8, para a definição de uma célula vizinha à qual é drenada a água de cada elemento do espaço celular. O presente trabalho contribui com a implementação de um modelo hidrológico distribuído na plataforma de modelagem gratuita *TerraME*. Dentre as possibilidades de uso do código, está a elaboração de mapas de risco de enchentes para locais onde a vazão máxima suportada é conhecida. Cita-se, ainda, a possibilidade de variação nos parâmetros de entrada do modelo de modo a produzir simulações de uso do solo e o seu conseqüente impacto no comportamento hidrológico da bacia.

DISTRIBUTED DYNAMIC HYDROLOGIC MODELLING FOR SURFACE RUNOFF ESTIMATION IN AN URBAN WATERSHED

ABSTRACT

Floods and inundations are serious problems in Brazilian cities as a result of inappropriate urbanization processes. Impervious surface reduces or makes water infiltration impossible, leading to significant increases in surface runoff. Considering this scenario, this work aims at applying a dynamic distributed hydrological model in order to estimate surface runoff in an urban watershed. The test area for the model application is a 47.54 km² watershed in the city of Petrópolis, located in a mountainous region in Rio de Janeiro State. The hydrological model applied is the Soil Conservation Service Curve Number method, used to estimate surface runoff, implemented within the *TerraME* framework. This platform executes routines for spatial dynamic modelling on a cell structure named CellularSpace, over which the study area is discretized. The parameters values for the model application were calibrated by an optimization process using hydrological data from three monitoring stations distributed over the basin recording rainfall and water levels. After the calibration, the model validation was executed, resulting in a good fitting of simulated flows and variations of fluvimetric levels. In the hydrologic dataset, flow data was not available. For this reason, the analysis lied on checking the variation standard among calculated flows and water levels measurements. For the model implementation, it was necessary the creation of a routine, based on the flow directions obtained from the D8 algorithm, in order to define the neighbor cell to which the water from each cellular space element is drained. The main contribution of the present work is the implementation of a distributed hydrological model using the free TerraME modelling environment. Among the possibilities of use of the implemented code there is the elaboration of flooding risk maps where the maximum supported flow is known. It is also possible to vary the parameters values allowing simulations of land use and its impact on the hydrological behavior of the basin.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Objetivo	24
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1 Modelo hidrológico	25
2.2 O método de Curva Número do SCS	28
2.3 Direção do fluxo de escoamento a partir de um DEM	37
2.4 <i>TerraME</i>	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 Área de estudo	45
3.2 Organização e estrutura dos dados utilizados	46
3.3 Modelo hidrológico utilizado	49
3.4 Metodologia	49
3.4.1 Organização e geração dos dados espaciais	49
3.4.2 Construção do Banco de Dados <i>TerraView</i>	50
3.4.3 Implementação do modelo hidrológico distribuído	51
3.4.4 Calibração dos parâmetros do modelo	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1 Parâmetros hidrológicos de entrada	61
4.1.1 Análise dos dados hidrológicos	61
4.1.2 Otimização dos valores para os parâmetros de entrada	65
4.1.3 Validação	71
4.2 Modelo distribuído	72
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE	85

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Componentes do ciclo hidrológico.	27
2.2 – Hidrograma característico com as variáveis de tempo.	33
2.3 – Hidrograma triangular com as variáveis de tempo na chuva Δt	35
2.4 – Hidrograma triangular considerando $\Delta t < T_b < 2\Delta t$	36
2.5 – Hidrograma triangular considerando $2\Delta t < T_b < 3\Delta t$	37
2.6 – Determinação dos sentidos de escoamento segundo o algoritmo D8.	38
2.7 – Módulos e serviços do <i>TerraME</i>	42
2.8 – Vizinhança de Moore em cinza para a célula de referência X	43
3.1 – Localização da bacia de interesse.	46
3.2 – Uso e cobertura do solo com a localização das estações.	47
3.3 – Estações pluviométricas/fluviométricas com sub-bacias e drenagens.	48
3.4 – Codificação LDD gerada pelo HAND (a) e pelo SPRING (b).	50
3.5 – Fluxograma do processo de calibração dos parâmetros	59
4.1 – Dados hidrológicos das três estações de monitoramento.	62
4.2 – Precipitação e variação do nível da água entre os dias 19 e 20 de dezembro de 2007	64
4.3 – Cotas médias seguidas do escoamento base para as três estações.	67
4.4 – Vazões estimadas e cotas normalizadas para as três estações.	69
4.5 – Vazões estimadas e cotas normalizadas para a estação Liceu no período de 2 a 14 de fevereiro de 2008	71
4.6 – Representação do modelo hidrológico distribuído com o respectivo hidrograma do ponto de saída da bacia para os dias 12, 13 e 14 de dezembro de 2008	73

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 - Variáveis do Banco de Dados SPRING	50
3.2 – Atributos iniciais do espaço celular	51
3.3 – Valores iniciais de Curva Número para as classes de uso e cobertura do solo	56
3.4 – Intervalos iniciais para a otimização dos parâmetros de entrada do modelo.....	57
hidrológico.....	57
4.1 – Matriz de correlação entre as chuvas e as cotas das três estações	64
4.2 – Valores otimizados para os parâmetros do modelo hidrológico do SCS	65

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado dos núcleos urbanos é uma realidade atual em todo o mundo. Tal crescimento, quando feito de forma desordenada e sem planejamento adequado, gera vários agravantes que põem em risco o meio ambiente, o bem estar dos habitantes e a própria infra-estrutura urbana (MULLIGAN e CRAMPTON, 2005).

Dentre os diversos efeitos do processo de urbanização, destaca-se a ocorrência de alagamentos, inundações e enchentes (JONKMAN, 2005). A definição exata destes três termos é dada por Castro (1998):

Alagamento: Água acumulada no leito das ruas e no perímetro urbano por fortes precipitações pluviométricas, em cidades com sistemas de drenagem deficientes.

Inundação: Transbordamento de água da calha normal de rios, mares, lagos e açudes, ou acumulação de água por drenagem deficiente, em áreas não habitualmente submersas.

Enchente: Elevação do nível de água de um rio, acima de sua vazão normal. Termo normalmente utilizado como sinônimo de inundação.

As enchentes e inundações têm trazido grandes problemas para as cidades brasileiras. Entre 1998 e 2000, as enchentes afetaram 22,43% das cidades brasileiras (IBGE, 2000). Mais frequentes no verão, o estado que mais sofreu com o problema foi São Paulo, onde 262 municípios sofreram inundações no período em questão. Percentualmente, porém, o estado do Rio de Janeiro foi o que mais sofreu prejuízos, com 63,74% das cidades afetadas pelas enchentes, enquanto que no estado de São Paulo, o percentual foi de 40,62%.

As inundações podem ser acentuadas pela impermeabilização do solo decorrente da implantação de infra-estrutura urbana. Desta forma, onde há uma cidade estabelecida, espera-se um aumento da probabilidade de ocorrência de enchentes. Este fato fica evidente ao se observar a maior ocorrência de enchentes nos dois estados mais urbanizados do país.

O impacto da urbanização no ciclo hidrológico é complexo e afeta quase todos os processos hidrológicos (BRILLY et al. 2006). Com a urbanização, a cobertura da bacia é convertida em pavimentos impermeáveis alterando o comportamento da bacia, como: o aumento do pico da vazão de cheia, a antecipação no tempo desta vazão máxima; aumento do volume do escoamento superficial; redução da infiltração do solo e a redução do escoamento subterrâneo (KANG et al., 1998). Vários trabalhos atestam o efeito dos diferentes usos do solo urbano no ciclo hidrológico da bacia (BROWN, 1988). Trabalhos como os de Kang et al. (1998), Cheng e Wang (2002) e Hundeda e Bárdossy (2004) demonstram quantitativamente como a impermeabilização do solo, devido ao processo de urbanização, provoca o aumento do escoamento superficial.

Além do escoamento superficial, a urbanização também pode acarretar uma diminuição do fluxo de escoamento abaixo do solo, importante no ciclo hidrológico. Brun e Band (2000) realizaram uma análise temporal dos efeitos da urbanização sobre os escoamentos superficial e sub-superficial em uma bacia hidrográfica. A metodologia empregada fez uma simulação que dividiu toda a bacia de estudo em sub-bacias. As simulações utilizaram cenários reais de cobertura do solo para três épocas diferentes. O índice de permeabilidade do solo foi atribuído com base em um mapa de uso do solo. Os autores concluíram que o aumento da área urbanizada (18% em 17 anos) diminuiu em cerca de 20% o escoamento sub-superficial sem alterar significativamente o escoamento superficial. Entretanto, simulações mostraram a existência de um limiar de 20% de impermeabilização do solo, a partir do qual o escoamento superficial aumenta mais rapidamente.

O aumento do escoamento superficial e diminuição do sub-superficial compromete áreas críticas da cidade com riscos de inundação. Problemas desse tipo em áreas urbanas devem ser cuidadosamente tratados com medidas de controle estruturais, realizadas quando o homem modifica o rio (obras hidráulicas, como barragens, diques e canalização) ou não estruturais, quando o homem convive com o rio (zoneamento de áreas de inundação, sistema de alerta ligado à defesa civil e seguros). No Brasil, não existe nenhum programa sistemático de controle de enchentes que envolva seus diferentes aspectos. O que se observam são ações isoladas por parte de algumas cidades.

Para evitar perdas e prejuízos, faz-se necessária a existência de um programa de controle de enchentes, juntamente com um bom planejamento de uso do solo urbano. O risco de inundações não está apenas associado à natureza física do evento, como a frequência e a intensidade das chuvas ou à proximidade da área de várzea do rio. O risco também se relaciona com a habilidade de administrar, enfrentar e até mesmo de se adaptar ao próprio fenômeno (TREBY et al., 2006). Por isso, a prevenção de enchentes deve levar em conta, além dos fatores físicos, questões sociais, econômicas e políticas, a fim de tornar mínimo o impacto das enchentes (WHITE e HOWE, 2002).

Sendo assim, em um programa de prevenção de enchentes é de grande utilidade a existência de um mapa de risco, a fim de identificar as principais áreas com potencial de inundação. Um mapa desta natureza contém informações sobre uma área ou objeto com potencial de risco de enchente para diferentes cenários de chuva. Isto implica diretamente em conseqüências legais e econômicas, como a competência das autoridades públicas para o programa de controle, o planejamento espacial e políticas de seguro (BÜCHELE et al., 2006).

A Alemanha conta com um programa nacional de mapeamento detalhado das áreas com riscos de inundações. Uma das metodologias utilizadas no mapeamento é descrita em Büchele et al. (2006), que considera a vazão máxima associada com o tempo de retorno, a área de captação da bacia, porcentagem de área urbana e de florestas, precipitação média anual, dentre outros parâmetros.

O uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) constitui uma importante ferramenta na detecção e mapeamento de áreas com risco de inundações. Mosquera-Machado e Ahmad (2007) usaram técnicas estatísticas e modelagem hidráulica em ambiente SIG para mapear áreas com risco de enchente em Quibdó na Colômbia para diferentes períodos de retorno. Os autores concluem que a elaboração de mapas de risco é fundamental para o processo de tomada de decisão no que diz respeito ao fornecimento de informações essenciais para o entendimento da natureza e das características do fenômeno. Por isso, o primeiro passo para a avaliação dos impactos da

inundação é a elaboração de mapas de risco, úteis no manejo operacional em caso de desastres (MOSQUERA-MACHADO e AHMAD, 2007).

Stephenson (2002) propõe um índice de risco de enchentes ao longo de um rio que cruza uma malha urbana na África do Sul. Tal índice se baseia no período de retorno das cheias do rio (inverso da probabilidade de ocorrência da cheia), na velocidade de escoamento e no nível atingido pela água. Uma combinação entre o nível e a velocidade atingidos pela água indica o potencial de dano da enchente. Este potencial é associado com o período de retorno da cheia para produzir o índice. O indicador gerado auxilia o planejamento da ocupação na área com parâmetros quantitativos para a definição de restrições quanto ao desenvolvimento de construções às margens do rio. Vale ressaltar que o índice utilizado por Stephenson (2002) indica graus de risco. Portanto, cabe às autoridades administrativas locais adotar um limiar quanto ao grau tolerado.

Em síntese, a obtenção de um mapa com risco de enchente consiste em estimar vazões de pico para uma determinada chuva, dada a vazão máxima suportada na área em questão. Caso a vazão de pico seja maior do que a vazão suportada, tem-se um volume de água excedente diretamente proporcional à intensidade da inundação.

1.1 Objetivo

Dentro desse contexto, o objetivo do presente trabalho é implementar um modelo hidrológico dinâmico distribuído a fim de estimar o escoamento superficial e a vazão de máxima dado um evento chuvoso em uma microbacia urbana.

Uma das contribuições do trabalho é a implementação de um modelo hidrológico distribuído, a partir de um conjunto de dados hidrológicos e espaciais, em uma plataforma de modelagem gratuita, o que amplia o uso do sistema pela comunidade técnico-científica.

Pretende-se, com o presente trabalho, fornecer subsídios para a geração de um mapa de risco de enchentes em áreas onde a vazão máxima suportada por determinados pontos seja conhecida.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Modelo hidrológico

De maneira geral, um modelo é um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros. Pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem esta realidade. Um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou sub-superfície terrestre (RENNÓ, 2004).

Os modelos em recursos hídricos podem ser classificados segundo vários critérios. Um dos critérios de classificação dos modelos se aplica à escala espacial em que as variáveis do mesmo são consideradas. Assim, os modelos hidrológicos podem ser divididos em concentrados ou distribuídos. Enquanto os modelos concentrados procuram representar grandes áreas através de variáveis supostas homogêneas no seu interior, os modelos distribuídos dividem o espaço a modelar em pequenos compartimentos aos quais se aplicam as variáveis consideradas. Destaca-se que no interior de cada um dos pequenos compartimentos dos modelos distribuídos estas variáveis também são consideradas homogêneas. Deste modo, os modelos distribuídos podem representar melhor a diversidade de usos do solo ou campos de precipitação (MAGALHÃES, 2005).

A aplicação de um modelo hidrológico concentrado apresenta a limitação de proporcionar sempre uma análise pontual, na saída da bacia, de modo a representar o comportamento de toda a área de contribuição (área sobre a qual escoar, por gravidade, toda a água precipitada até a seção do rio). Por outro lado, um modelo distribuído provê uma representação espacial do modelo discretizado na escala de células ao longo da área de contribuição. A representação espacial de processos hidrológicos se faz importante para o planejamento da bacia sob vários aspectos, dentre eles o que diz respeito à ocupação urbana (GEETHA et al., 2008), pois conhecido o comportamento do fluxo de água da bacia, é possível inferir as áreas influenciadas por quaisquer atividades instaladas sobre a mesma.

A bacia hidrográfica é o objeto de estudo da maioria dos modelos hidrológicos, reunindo as superfícies que captam e despejam água sobre um ou mais canais de escoamento que desembocam em uma única saída. Por conseguinte, a entrada no modelo hidrológico constitui uma série de precipitações na bacia e os resultados são as parcelas do ciclo hidrológico que se deseja modelar.

As componentes envolvidas no ciclo hidrológico são resultados dos diferentes processos sofridos pela água na bacia hidrográfica, cuja entrada no sistema é a precipitação. As principais parcelas do ciclo hidrológico são: a precipitação, a evaporação de superfícies líquidas, a evaporação de água do solo e a transpiração dos seres vivos (sendo estas duas parcelas, usualmente, consideradas de modo combinado e denominadas de evapotranspiração), a infiltração, e os escoamentos superficiais, sub-superficiais e subterrâneos (MAGALHÃES, 2005).

A água precipitada é primeiramente retida em depressões ou interceptada pelos objetos da superfície ou acima dela, como copa das árvores, telhado das construções, etc. Parte dessa água é perdida para a atmosfera por evaporação. Da água que chega à superfície, parte pode ser evaporada, parte infiltrada no solo e outra parte escoada superficialmente. Ao mesmo tempo em que a água se infiltra no solo, esta também pode ser absorvida pelas raízes da vegetação e transpirada pelas folhas. A Figura 2.1 ilustra as citadas componentes do ciclo hidrológico de maneira simplificada.

As componentes representadas na Figura 2.1 refletem apenas os primeiros efeitos de uma precipitação. Em uma modelagem mais rigorosa considera-se ainda o fluxo da água que infiltra no solo e passa pelo processo de percolação dando origem ao escoamento sub-superficial. É possível considerar também o fluxo abaixo da superfície, alimentado pela água do lençol freático, denominado de escoamento subterrâneo, ou escoamento base.

No ciclo hidrológico, a água precipitada se divide em várias componentes. A precipitação efetiva é a parcela do total precipitado que gera o escoamento superficial (TUCCI, 2002). O processo de transformação de precipitação em escoamento é

altamente complexo, dinâmico, não linear e apresenta variabilidade espacial e temporal, afetada por vários fatores físicos relacionados (GEETHA et al., 2008).

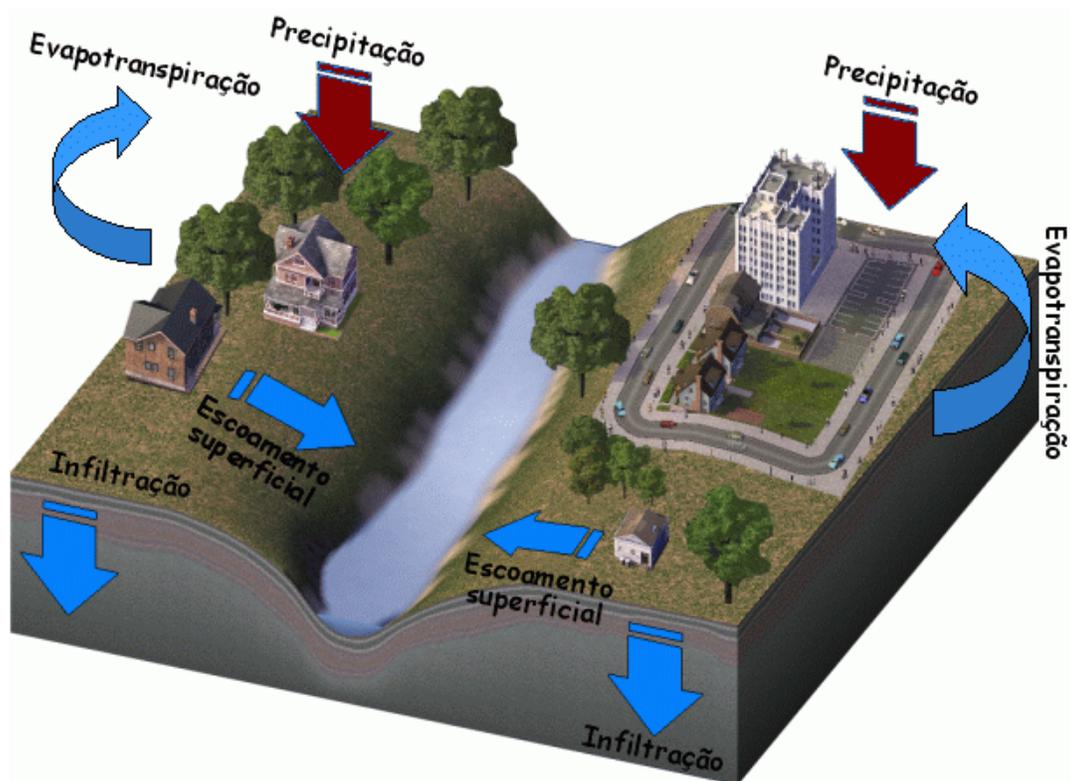


Figura 2.1 - Componentes do ciclo hidrológico.

Os modelos hidrológicos, como qualquer tipo de modelo, são simplificações da realidade. Considerando fatores mais simples ou ambientes mais complexos, os modelos hidrológicos buscam estimar cada componente do ciclo da água. Um exemplo de um modelo bem detalhado é encontrado em Arnold e Williams (1995) com o *Simulator for Water Resources in Rural Basin* (SWRRB). O modelo proposto pelos autores considera além da água da chuva, a água advinda do derretimento de neves e geleiras e simula o escoamento superficial e sub-superficial, a evapotranspiração, as perdas de transmissão, dentre outros.

Desconsiderando ou omitindo as parcelas menos relevantes, os modelos hidrológicos buscam a representação de processos do ciclo hidrológico como uma forma de conhecer o comportamento da natureza, permitindo assim, a elaboração de diversos estudos de

engenharia (MAGALHÃES, 2005). A simulação do escoamento superficial, por exemplo, se faz importante para o gerenciamento e desenvolvimento de recursos hídricos, controle de enchentes, projetos de irrigação e drenagem, projetos de estruturas hidráulicas e a geração de energia hidroelétrica (GEETHA et al., 2008).

2.2 O método de Curva Número do SCS

A técnica de Curva Número do Serviço de Conservação do Solo dos EUA (SCS) foi originalmente desenvolvida na década de 1950, a fim de estimar a transformação direta da precipitação em escoamento superficial (SCS, 1957). É um método simples e utilizado largamente por muitos anos nos EUA e no Brasil (MAGALHÃES, 2005). Desde seu desenvolvimento, tem sido revisado e modificado por vários autores como Mishra e Singh (1999), Woodward et al. (2003), Mishra et al. (2003), Mishra et al. (2008), entre outros.

Segundo Arnold e Williams (1995), o método apresenta as seguintes vantagens: é consistente; computacionalmente eficiente; os dados de entrada necessários são geralmente disponíveis; além de relacionar o escoamento superficial com o tipo, o uso e a cobertura do solo.

O método do SCS baseia-se no conceito de que a lâmina de escoamento superficial produzida em um dado evento é uma função da altura total da lâmina precipitada e de um parâmetro, denominado Curva Número (CN), que representa as perdas que ocorrem, principalmente, devido à infiltração, à interceptação vegetal e à retenção em depressões do terreno.

2.2.1 Valores de Curva Número

O primeiro cálculo a ser efetuado é o fator de retenção S da bacia, que representa a maior diferença possível entre a chuva e o escoamento superficial quando a precipitação tende ao infinito (WOODWARD et al., 2003). O fator S representa o potencial máximo de retenção após o início do escoamento (ASCE, 1996). O fator de retenção é calculado em mm como:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2.1)$$

onde, CN é um valor de Curva Número tabelado.

O valor de Curva Número é adimensional e pode variar de 1 a 100. Está diretamente associado com a impermeabilidade do solo, sendo que quanto mais impermeável for a área, maior será o CN e menor será a retenção da chuva (S).

Os valores de CN são obtidos para cada tipo de uso e cobertura do solo em uma tabela padrão do SCS que leva em conta o tipo e a densidade de cobertura sobre a área em conjunto com quatro grupos de solos classificados de acordo com a taxa de infiltração. Os grupos de solo são divididos em A, B, C e D, sendo o grupo A o mais permeável, com baixo potencial de escoamento e o grupo D o mais impermeável, com alto potencial de escoamento.

A aplicação do modelo de Curva Número leva em conta a condição média de umidade antecedente do solo, chamada de AMC (*Antecedent Moisture Condition*). Esta condição considera os eventos chuvosos ocorridos nos cinco dias anteriores ao dia analisado. São três as condições AMC consideradas:

AMC 1 – Situação em que os solos estão secos. Tucci (2002) sugere que para a superfície atingir esta condição, a precipitação acumulada dos cinco dias anteriores deve ser menor que 36 mm;

AMC 2 – Situação média em que os solos correspondem à umidade de capacidade de campo;

AMC 3 – Situação em que ocorreram precipitações consideráveis nos últimos cinco dias e o solo encontra-se saturado. Nesta condição, a precipitação acumulada nos cinco dias anteriores deve ser maior que 53 mm, segundo Tucci (2002).

Os valores de CN encontrados nas tabelas do SCS correspondem ao valor para a situação média, AMC 2 (CN₂). As correções para as situações 1 (CN₁) e 3 (CN₃) são calculadas em função do valor de CN₂ por (ARNOLD e WILLIAMS, 1995):

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{100 - CN_2 + \exp[2,533 - 0,0636(100 - CN_2)]} \quad (2.2)$$

$$CN_3 = CN_2 \exp[0,00673(100 - CN_2)] \quad (2.3)$$

Os valores tabelados de CN₂ são estabelecidos para uma bacia com declividade média de 5%. Arnold e Williams (1995) propõem um ajuste deste valor para outras declividades por meio da equação:

$$CN_{2S} = \frac{1}{3}(CN_3 - CN_2) [1 - 2 \exp(-13,86Dec)] + CN_2 \quad (2.4)$$

onde, Dec é a declividade média da bacia.

Após o cálculo de CN_{2S}, as correções de CN₁ e CN₃ pelas equações (2.2) e (2.3) devem ser feitas substituindo-se o valor de CN₂ por CN_{2S}.

2.2.2 Chuva Efetiva e Absorção Inicial

Definidos e corrigidos os valores de Curva Número para as três condições AMC, calcula-se o fator de retenção S pela Equação 2.1. De posse de S, a porção de chuva transformada em escoamento superficial é definida pela relação:

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia) + S} & \text{se } P > Ia \\ Q = 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.5)$$

onde, Q é o escoamento superficial em mm;

P é a precipitação em mm;

S é o fator de retenção calculado pela Equação 2.1; e

Ia é o parâmetro de absorção inicial definido por:

$$Ia = \lambda S \quad (2.6)$$

onde, λ é a constante de absorção inicial (MISHRA et al., 2006).

A absorção inicial representa todas as perdas antes do início do processo de escoamento, incluindo a água retida em depressões do solo, interceptação pela vegetação, evaporação e infiltração.

A constante λ , também chamada de razão Ia/S, tem papel fundamental na aplicação do modelo, porque define o parâmetro de absorção inicial Ia a ser utilizado como limiar na Equação 2.5 para o cálculo da chuva efetiva Q. Quanto maior o valor da absorção inicial, mais intensa deve ser a precipitação a fim de produzir um escoamento superficial significativo.

Tradicionalmente, utiliza-se o valor da constante λ como 0,2 (ASCE, 1996). Pandey et al. (2003) utilizam o modelo CN-SCS adaptado ao solo indiano com o valor de 0,3 para λ . No entanto, alguns autores atestaram que valores menores para esta constante modelam melhor o escoamento superficial, principalmente, em bacias pequenas ou urbanizadas.

Woodward et al. (2003) determinaram o coeficiente com dados de 307 bacias e um total de 28301 eventos de chuva nos EUA. Os resultados mostraram que a constante varia em função da bacia e da intensidade da precipitação e raramente são maiores que 0,2. Mais de 90% dos valores ideais encontrados foram menores que 0,2. De acordo com a análise dos autores, a média encontrada para a constante foi de 0,0476.

Mishra e Singh (2004) avaliaram o impacto da constante λ no modelo CN-SCS e concluíram que o aumento da constante diminui a eficiência do modelo. A eficiência máxima encontrada pelos autores foi obtida com valores de λ da ordem de 0,01.

Mishra et al. (2006) aplicaram o modelo CN-SCS em um conjunto de 84 bacias pequenas nos EUA (entre 0,17 ha e 71,99 ha) variando parâmetros como os limites das condições AMC (precipitação acumulada dos cinco dias anteriores) e a constante λ . Os melhores resultados foram encontrados com valores de λ menores que 0,1.

Baltas et al. (2007) encontraram para uma bacia de 15,18 km² na Grécia, valores muito próximos do indicado por Woodward et al. (2003). Nos experimentos de Baltas et al. (2007), os valores ideais de λ para cada evento de chuva variaram de 0,014 a 0,054, com uma média de 0,037.

2.2.3 Hidrograma

Denomina-se hidrograma ou hidrógrafa, a representação gráfica da variação da vazão em relação ao tempo (TUCCI, 2002). O comportamento típico de um hidrograma após um evento de precipitação é apresentado na Figura 2.2. É possível verificar um atraso entre o início da chuva e o tempo em que o nível de vazão começa a se elevar. Este atraso deve-se às perdas iniciais por interceptação da vegetação e depressões no solo, além do próprio retardo de resposta da bacia devido ao tempo de deslocamento de água na mesma. A partir daí, o processo predominante no período que vai até a vazão de pico é o escoamento superficial. Após atingir a vazão máxima, o hidrograma apresenta uma queda, onde o ponto de inflexão da curva caracteriza o fim do escoamento superficial e a predominância do escoamento subterrâneo, alimentado pelas águas do lençol freático. O fluxo base, apresentado no hidrograma da Figura 2.2, é resultado do escoamento sub-superficial alimentado pela água infiltrada no solo.

Vários fatores podem alterar a forma do hidrograma, fazendo com que a vazão fique mais distribuída ou mais concentrada no tempo. Dentre os principais fatores, cita-se: o relevo; modificações artificiais no rio; a distribuição, duração e intensidade das precipitações; a forma e o tipo de cobertura da bacia (TUCCI, 2002).

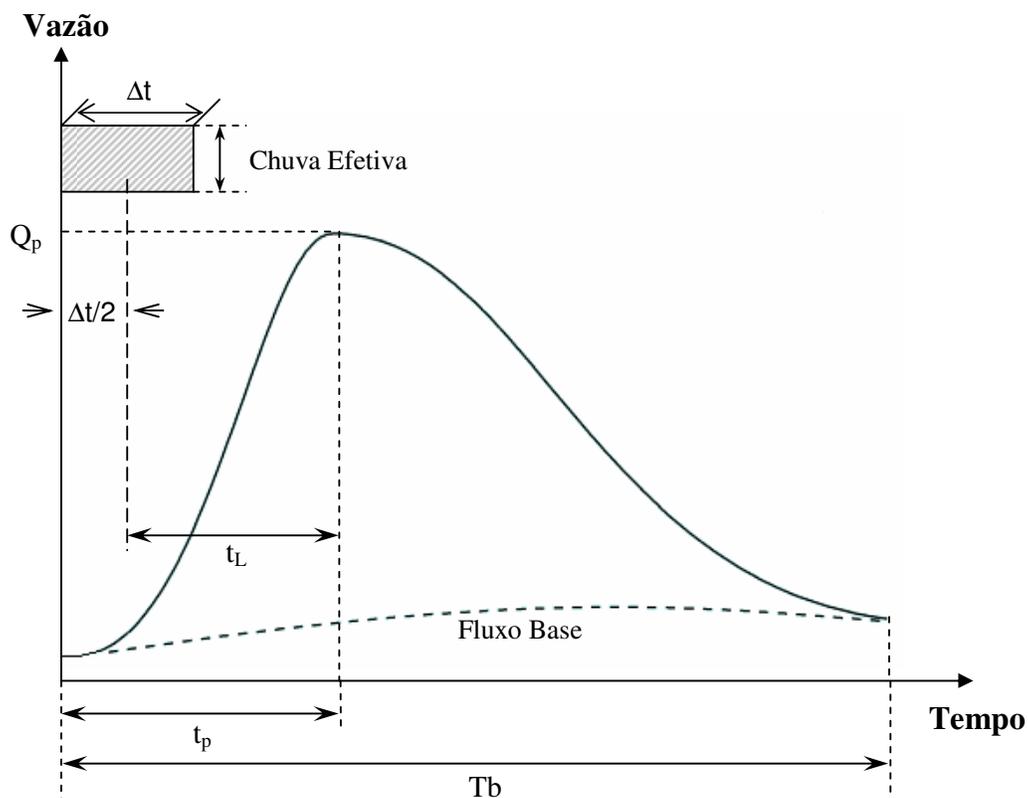


Figura 2.2 – Hidrograma característico com as variáveis de tempo.

Fonte: Adaptado de ASCE (1996).

Na caracterização do hidrograma e do comportamento da bacia são utilizadas algumas variáveis de tempo relacionadas a seguir:

Tempo de concentração (t_c): tempo necessário para uma partícula de água se deslocar desde o ponto mais distante na bacia até a saída da bacia ou um determinado local considerado (ASCE, 1996). Esse tempo também pode ser definido como o tempo entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma (TUCCI, 2002);

Tempo de retardo – lag time (t_L): intervalo de tempo entre o centro de massa da chuva efetiva e o pico de vazão (ASCE, 1996). Para bacias médias, e com escoamento superficial aproximadamente uniforme na bacia, o tempo de retardo relaciona-se com o tempo de concentração por:

$$t_L = 0,6 t_c \quad (2.7)$$

No método do SCS, o tempo de retardo em horas é calculado por:

$$t_L = \frac{1,347L_f^{0,8}(S + 2,54)^{0,7}}{1900Dec_p^{0,5}} \quad (2.8)$$

onde, L_f é o comprimento hidráulico em m e corresponde ao maior caminho percorrido pela água dentro da bacia até o ponto considerado;

S é fator de retenção em cm calculado na Equação 2.1;

Dec_p é a declividade média da bacia em porcentagem.

Tempo do pico (t_p): tempo entre o início da chuva e o pico do hidrograma. Considerando que o tempo de retardo é contado a partir do centro de massa da chuva efetiva e o tempo de pico do início da precipitação, o cálculo de t_p é obtido com a adição de metade do tempo considerado para o evento chuvoso (ASCE, 1996):

$$t_p = t_L + \Delta t/2 \quad (2.9)$$

Tempo de base (T_b): é o tempo entre o início da precipitação e aquele em que a precipitação ocorrida já escoou através da seção principal, ou que o rio volta às condições anteriores à da precipitação (TUCCI, 2002). As análises de um conjunto de hidrogramas do Serviço de Conservação do Solo dos EUA (USDA, 1972) resultaram na seguinte relação para o cálculo de T_b :

$$T_b = 2,67094 t_p \quad (2.10)$$

A definição de um hidrograma pode ser aproximada por um triângulo (USDA, 1972), no qual as variáveis de tempo acima definidas e a vazão de pico definem a forma do hidrograma triangular para um evento de chuva ocorrido em um intervalo de tempo Δt (Figura 2.3).

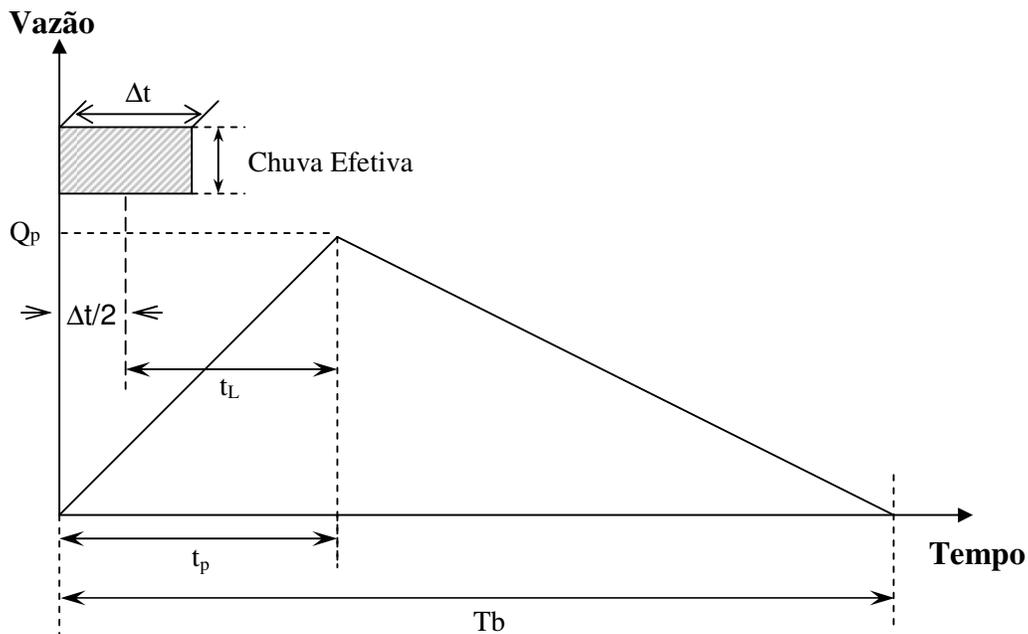


Figura 2.3 – Hidrograma triangular com as variáveis de tempo na chuva Δt .

Fonte: Adaptado de ASCE (1996).

O valor da integral da curva do hidrograma reproduz o volume total de água escoado superficialmente (Q). Sendo assim, o cálculo da área do triângulo da Figura 2.3 em função das variáveis apresentadas no hidrograma triangular reproduz a chuva efetiva. A partir deste cálculo, obtém-se a vazão de pico, Q_p (em m^3/s), pela Equação (ASCE, 1996):

$$Q_p = \frac{2,08073241781107 \ A Q}{t_p} \quad (2.11)$$

onde, A é a área de drenagem em km^2 ;

Q é a precipitação efetiva em cm calculada pela Equação 2.5;

t_p é o tempo de pico em horas calculado pela Equação 2.9.

Nos casos em que o tempo de base (T_b) é maior do que Δt , a precipitação efetiva (Q) exigirá um tempo maior do que Δt para escoar totalmente. Neste caso, para se conhecer o volume de água escoado apenas no intervalo de tempo Δt ($Q_{\Delta t}$), deve-se calcular a

área do hidrograma até Δt . O volume restante de água do primeiro intervalo de tempo (Q_{R1}) é calculado pelo restante da área do hidrograma. A Figura 2.4 ilustra um caso em que $\Delta t < T_b < 2\Delta t$.

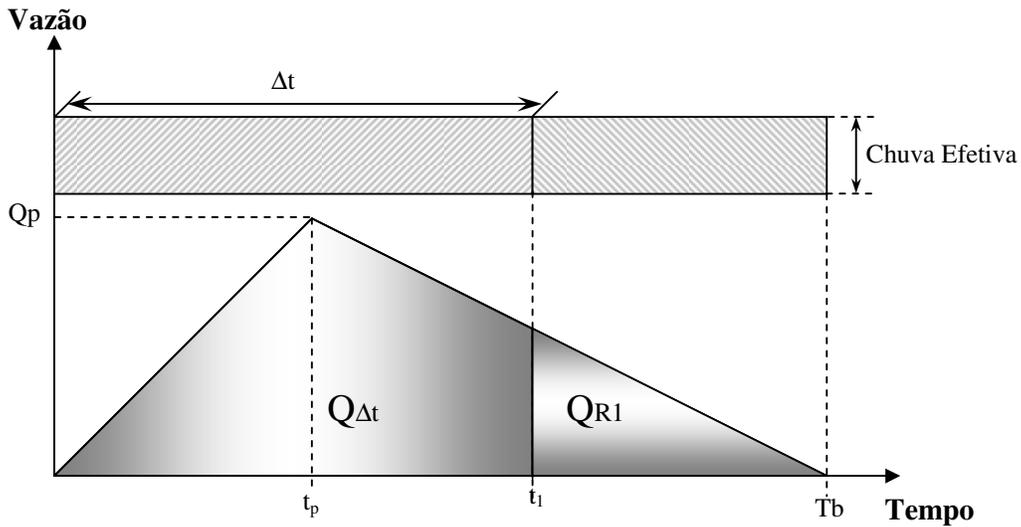


Figura 2.4 – Hidrograma triangular considerando $\Delta t < T_b < 2\Delta t$.

Neste caso, a água restante Q_{R1} do escoamento provocado pela precipitação no primeiro intervalo de tempo Δt é obtida calculando-se a área do triângulo Q_{R1} :

$$Q_{R1} = \frac{Q_p (T_b - \Delta t)^2}{2(T_b - t_p)} \quad (2.12)$$

No caso em que $2\Delta t < T_b < 3\Delta t$, o volume de água restante do escoamento em t_1 e que será somado ao escoamento em t_2 e t_3 , é obtido pelo cálculo das áreas Q_{R1} e Q_{R2} respectivamente (Figura 2.5).

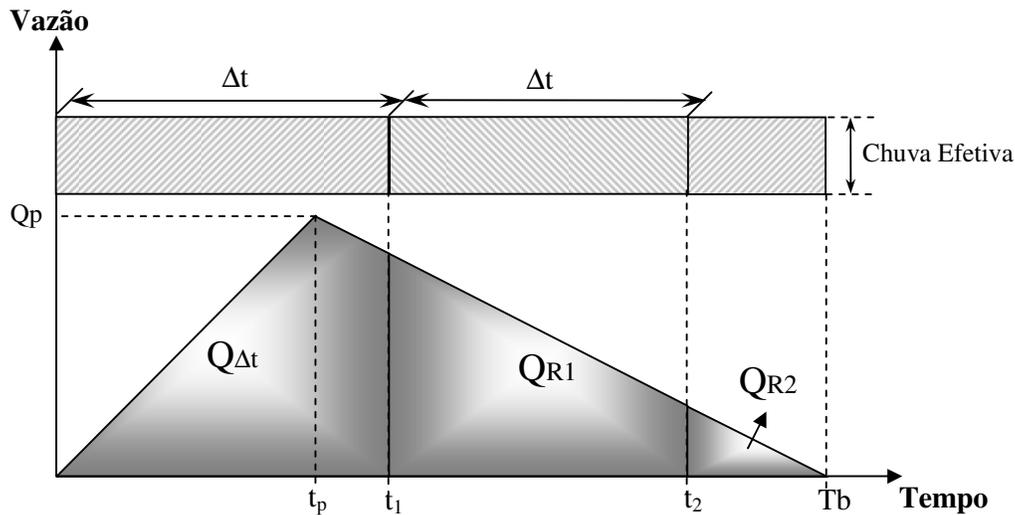


Figura 2.5 – Hidrograma triangular considerando $2\Delta t < T_b < 3\Delta t$.

2.3 Direção do fluxo de escoamento a partir de um DEM

A água precipitada e o fluxo escoado pela superfície em uma bacia hidrográfica se acumulam em canais que formam a rede de drenagem. Sendo assim, redes de drenagem são feições topográficas onde se concentra o volume de água escoado pela superfície (SOILLE e GRATIN, 1994). Os caminhos de fluxo de água são determinados primordialmente com base na topografia. A determinação de tais caminhos depende das direções de escoamento, obtidas a partir de modelos digitais de elevação (DEM).

Em termos computacionais, um DEM pode ser armazenado de três formas: isolinhas, também conhecidas como curvas de nível; rede irregular de triângulos (TIN); e grade regular. Direções de escoamento e caminhos percorridos pela água foram obtidas diretamente a partir de isolinhas por O'Loughlin (1986) e Moore e Grayson (1991); a partir de TIN por Gandoy-Bernasconi e Palacios-Velex (1990); e com grade regular por vários autores, como O'Callaghan e Mark (1984), Band (1986), Quinn et al. (1991), Costa-Cabral e Burges (1994), Tarboton (1997), dentre outros.

A forma mais comum de representação de um DEM é a grade regular, onde um valor de cota é atribuído a cada elemento da grade. A grande maioria dos modelos hidrológicos distribuídos disponíveis utiliza esta abordagem, em virtude da sua fácil implementação

(COLLINS e MOON, 1981). No entanto, Rennó e Soares (2001) realizaram uma comparação entre o uso de isolinhas e de grade regular para a estimativa de linhas de drenagem. Os autores concluíram que as curvas de nível produzem linhas de fluxo mais naturais e podem representar melhor os processos hidrológicos de uma bacia. O problema da representação de grade regular reside no fato de produzir áreas localmente planas, dificultando a definição da direção do fluxo superficial da água e gerando linhas de fluxo descontínuas. Sendo assim, o uso de grade regular para a determinação de linhas de fluxo exige uma correção prévia deste problema.

O primeiro método, e o mais simples para determinar a direção de escoamento a partir de um DEM com estrutura de grade regular, consiste em atribuir a cada célula da grade, uma das oito direções de seus vizinhos adjacentes e diagonais. O sentido escolhido é o do vizinho que apresentar a maior declividade com relação ao ponto analisado, conforme ilustra a Figura 2.6. Este método, designado de D8 (*Deterministic eight-node*), foi introduzido por O'Callaghan e Mark (1984) e tem sido usado em vários trabalhos (BAND, 1986; JENSON e DOMINGUE, 1988).

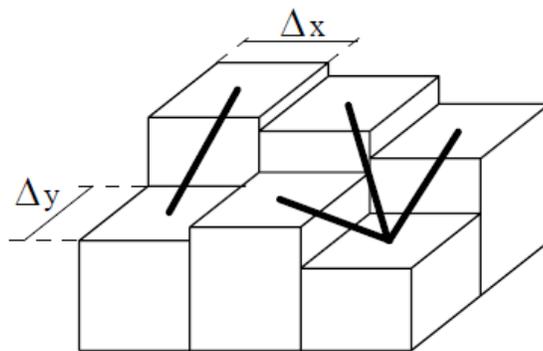


Figura 2.6 – Determinação dos sentidos de escoamento segundo o algoritmo D8.

Fonte: Hipólito e Portela (1997).

O algoritmo D8, porém, tem a desvantagem de discretizar a direção de escoamento em apenas oito direções possíveis múltiplas de 45° (QUINN et al., 1991). A fim de superar essa limitação, Fairfield e Leymarie (1991) sugeriram uma versão estocástica do D8 pela atribuição aleatória da direção de escoamento a um dos vizinhos de cota menor, com probabilidade proporcional à declividade. A técnica é chamada de Rho4 (*Random*

four-node) quando utiliza os vizinhos adjacentes (cardinais), ou de Rho8 (*Random eight-node*), quando utiliza todos os oito vizinhos (cardinais e diagonais).

Os algoritmos D8, Rho4 e Rho8 são métodos usados para determinar a direção de escoamento, chamados de “direção única”, uma vez que se determina apenas um vizinho para o qual deve ser escoado o fluxo da célula analisada. Técnicas de direção única apresentam a vantagem de produzir resultados mais definidos e identificar os canais mais permanentes, porém apresentam a desvantagem de não considerar o fato de que uma célula pode escoar para mais de um vizinho, ou seja, não leva em conta a dispersão.

Por conta dessas e de outras desvantagens do método de direção única, Quinn et al. (1991) propuseram um método de direção múltipla, em que cada célula escoar para todos os vizinhos de cota menor. Para cada elemento de resolução do DEM, utiliza-se a área acumulada das células que contribuem com o fluxo de escoamento acima e a declividade no ponto em questão. Uma metodologia semelhante é proposta por Freeman (1991) para estimar a direção de escoamento, porém sem considerar o volume de água acumulado.

Um algoritmo de direção múltipla, conhecido como D_{∞} , ou D-infinito (*Deterministic infinite-node*) foi proposto por Tarboton (1997), que utiliza o centróide da célula central e seus oito vizinhos para formar oito triângulos. O algoritmo calcula a declividade de cada triângulo e atribui a direção de escoamento àquele que apresentar o maior valor. As duas células vizinhas, interceptadas pelo triângulo escolhido, recebem o escoamento proporcionalmente à proximidade do aspecto (direção) do triângulo.

Algoritmos para a determinação da direção de escoamento em DEM com estrutura de grade regular têm sido desenvolvidos por vários autores em busca de melhores resultados, com diferentes níveis de complexidade. A adoção de um método depende, portanto, do nível de detalhamento desejado, exigindo assim algoritmos mais robustos ou mais simples.

O programa HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) desenvolvido em IDL por Rennó et al. (2008) executa o algoritmo D8 a partir de um DEM no formato de grade regular. O programa carrega uma grade altimétrica e executa correções no modelo de modo a gerar um DEM hidrológicamente consistente, ou seja, que produza linhas de fluxo contínuas. Após as correções, são calculados os sentidos de escoamento para cada célula, gerando uma grade chamada de *Local Drainage Direction* (LDD). A cada célula, é atribuído um código entre 1 e 8 que indica uma das oito células vizinhas para onde é drenada a água. Com a grade LDD, é possível extrair bacias de drenagem para qualquer ponto selecionado. Além disso, o sistema, de posse dos sentidos de LDD, ainda é capaz de acumular valores ao longo das direções de modo a se produzir uma grade com valores acumulados que representam a quantidade de elementos que escoam água para cada célula do DEM. A partir desta grade, o programa extrai a rede de drenagem com base em um limiar pré-definido.

O sistema SPRING (CÂMARA et al., 1996) também possui rotinas para o cálculo dos sentidos de fluxo de escoamento e da grade com valores acumulados. Entretanto, o processamento não contempla a correção do DEM a fim de se obter um modelo do terreno hidrológicamente consistente, o que resulta em linhas de fluxo descontínuas.

2.4 TerraME

TerraME (*Terra Modeling Environment*) é um ambiente de desenvolvimento criado por Carneiro (2006) para a implementação do conceito de autômatos celulares aninhados, a fim de proporcionar aplicações em modelagem dinâmica espacial. Dentre as principais aplicações desta plataforma, estão modelos de mudança de uso e cobertura da terra (LUCC) e de modelagem hidrológica.

A plataforma *TerraME* pode ser entendida como uma extensão da linguagem LUA com a inclusão de novos tipos de valores que foram criados por um mecanismo oferecido pela linguagem chamado “construtor de tabelas” (IERUSALIMSCHY et al., 1996). Por isso, um dos principais componentes de sua arquitetura é um interpretador que lê um programa escrito com a linguagem *TerraME*, interpreta o código fonte e chama funções

no *framework* do *TerraME*. O referido *framework* é um conjunto de módulos em linguagem C++ que fornece funções e classes para modelagem dinâmica espacial e está associado com uma base de dados espaciais gerenciada pela biblioteca de funções *TerraLib* (CÂMARA et al., 2000). A visualização dos dados e dos resultados dos processamentos é feito com o *software TerraView*, um aplicativo da biblioteca *TerraLib*. O ambiente de desenvolvimento recomendado para que um usuário escreva um código fonte em *TerraME* é o Eclipse SDK com um *plugin* para LUA.

Em resumo, a utilização do *framework TerraME* é feita em ambiente Eclipse SDK, com um *plugin* para linguagem LUA, e utiliza funções da biblioteca *TerraLib* que também gerenciam um banco de dados geográficos por meio do aplicativo *TerraView*. A Figura 2.7 ilustra os relacionamentos entre os módulos e os serviços do *TerraME*.

A estrutura do *TerraME* permite ao usuário definir os aspectos analíticos, espaciais e temporais de um modelo em várias escalas. A utilização de um modelo espacial com a estrutura do *TerraME* envolve três componentes: 1) um espaço celular, com uma determinada resolução, caracterizado por um conjunto de atributos; 2) um ou mais iteradores espaciais, a fim de definir a trajetória que indica a ordem em que o espaço celular deve ser percorrido para um determinado processo; e 3) uma ou mais relações de vizinhança entre as células (CARNEIRO, 2006).

O espaço celular, utilizado pelo *TerraME* nas aplicações de modelos espaciais, é definido por conjunto de células regularmente espaçadas, associadas com uma tabela de atributos, onde cada célula corresponde a um registro na tabela. O modelo de autômatos celulares aninhados permite que diferentes regiões do espaço possuam diferentes resoluções espaciais. Contudo, neste trabalho, uma única resolução das células para todo o espaço foi adotada.

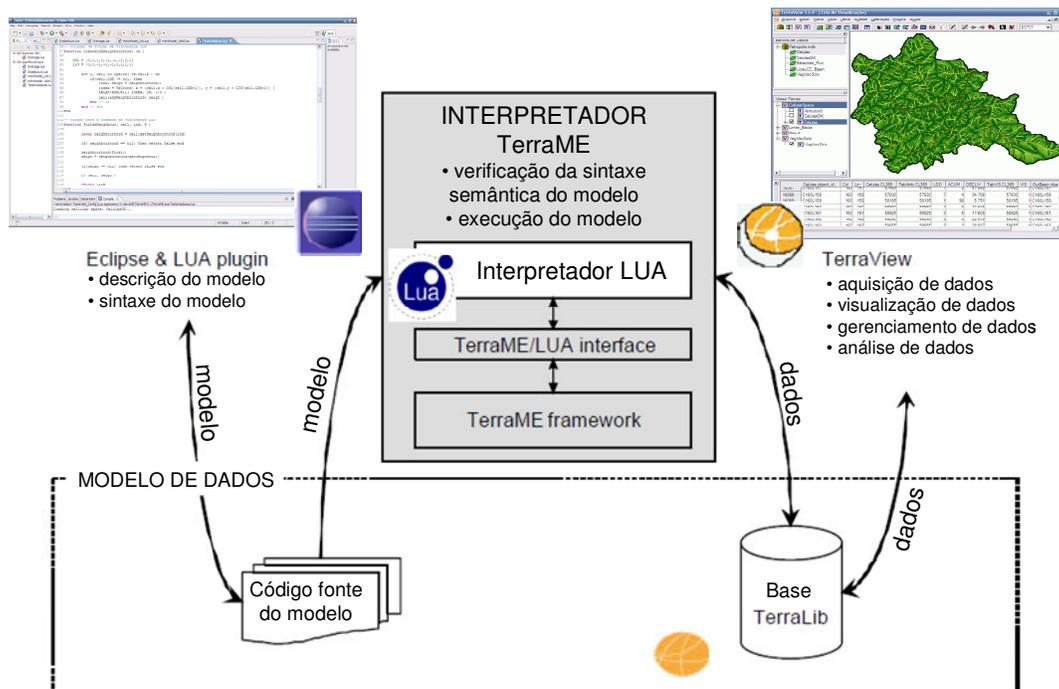


Figura 2.7 – Módulos e serviços do *TerraME*.

Fonte: Adaptado de Carneiro (2006).

A definição de um espaço celular no ambiente de desenvolvimento utiliza uma classe com o nome de *CellularSpace*. Tal classe é associada com uma base de dados espaço-temporal da biblioteca *TerraLib* e mapeia as coordenadas 2D de cada célula nos registros da tabela de atributos. Algumas propriedades devem ser especificadas para *CellularSpace*, como por exemplo: o sistema gerenciador de banco de dados utilizado, o nome e o local de armazenamento do banco de dados, o *layer* e o tema da base de dados *TerraLib* utilizados como entrada, e os atributos do espaço celular que serão carregados em memória.

Para percorrer o espaço celular, o *TerraME* dispõe da função *ForEachCell* que executa uma varredura em todas as células do espaço celular segundo uma dada trajetória, a fim de executar um determinado procedimento para cada elemento do espaço celular. A trajetória de varredura é feita por um iterador espacial chamado *SpatialIterator*, no qual são determinadas as condições que definem a ordem da trajetória de varredura do espaço celular. Quando se dispõe de um Modelo Digital de Elevação (DEM), pode-se

especificar, por exemplo, que um determinado processo seja executado das maiores altitudes para as menores.

Cada célula do espaço celular possui uma ou mais vizinhanças a fim de representar as relações de proximidade no espaço. Uma vizinhança é definida no *TerraME* como um tipo *Neighbourhood*, composto por um conjunto de pares formados por uma célula vizinha e um peso que representa a ponderação da relação. Uma maneira simples de criar uma vizinhança é por meio da função *CreateMooreNeighbourhood* que cria uma vizinhança de Moore ou vizinhança-8. A Figura 2.8 ilustra na cor cinza as células que compõem a referida vizinhança. É importante observar que a criação de uma vizinhança por meio da função citada considera também a própria célula de referência como vizinha de si mesma.

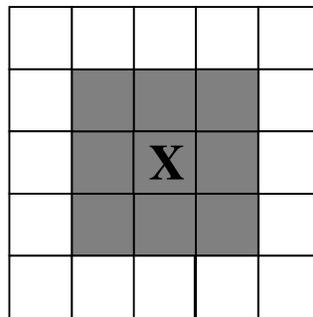


Figura 2.8 – Vizinhança de Moore em cinza para a célula de referência X

Uma vez criada uma vizinhança, a função *ForEachNeighbour* percorre todos os vizinhos de uma célula. Esta rotina recebe uma função como parâmetro, juntamente com a vizinhança criada, de modo que a função recebida seja aplicada a todas as células que constituem a vizinhança.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O território do Município de Petrópolis situa-se na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, na região serrana do estado do Rio de Janeiro, e abrange uma área de 774,606 km² entre as coordenadas 43° 22' W, 22° 12' S e 42° 58' W, 22° 34' S. A maior parte dessa área é constituída por montanhas, serras e picos, entrecortados de pequenos vales, onde se assenta a dispersa malha urbana do município, com maior concentração na porção sul.

Dentre os aspectos naturais de cobertura do solo, destaca-se a presença da Floresta Ombrófila Densa nas faixas altitudinais Altomontana, Montana e Submontana. O solo exposto aparece em pequena proporção, sendo menos presente do que os afloramentos rochosos da região. Os campos rupestres marcam presença nos altos das serras e se distribuem por todo o território municipal, propiciados pelas grandes altitudes que variam de 70 m a mais de 2000 m acima do nível do mar.

A ocupação e uso do solo urbano do município é consequência direta dos aspectos naturais do relevo. Em virtude da topografia acidentada, a ocupação de Petrópolis se dá em sua grande maioria nos vales junto aos rios que atravessam o município. Este é um dos principais motivos pelo qual a cidade sofre freqüentemente com a ocorrência de enchentes e inundações nos períodos chuvosos, além de deslizamentos de terra nas encostas dos morros.

A área de interesse deste trabalho (Figura 3.1) constitui uma porção inicial da bacia do rio Piabanha, afluente da margem direita do rio Paraíba do Sul. Com 47,538 km², a bacia abriga a nascente do rio Piabanha, que recebe como afluentes os rios Quitandinha e Palatinato. Apresenta 38,2 % de área urbanizada e 50,1% de cobertura florestal. As porções restantes contemplam 8,5% de vegetação secundária, 2,2% de solo exposto e apenas 0,9% de campos rupestres, que apesar de ocorrerem com mais freqüência no município, possuem baixa representatividade na bacia de interesse.

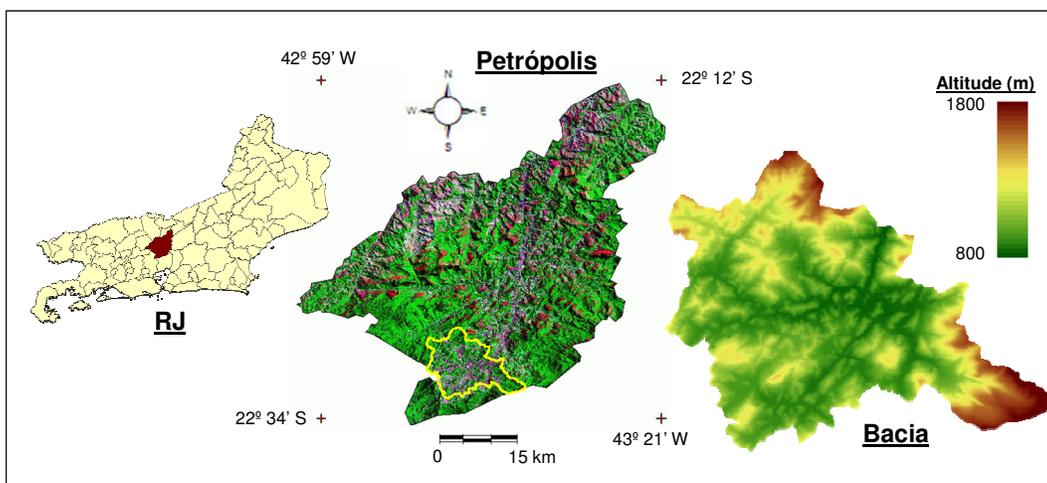


Figura 3.1 – Localização da bacia de interesse.

A declividade média da bacia de interesse é 38,8%. Em termos hidrológicos, apesar das florestas cobrirem metade da área, as altas declividades proporcionam um maior escoamento superficial. Na ocorrência de inundações, o escoamento das áreas montanhosas chega aos escoadouros principais, que apresentam alta impermeabilidade devido à intensa ocupação urbana, desencadeando dessa maneira o processo de enchentes nas áreas ocupadas. Uma das áreas consideradas críticas da cidade, devido à grande ocorrência de enchentes em épocas chuvosas, é o bairro Quitandinha, que integra a porção sul da bacia de interesse.

3.2 Organização e estrutura dos dados utilizados

O conjunto de dados utilizado no trabalho é composto basicamente por dados espaciais e dados hidrológicos. A organização de todos os dados espaciais foi realizada inicialmente em um banco de dados SPRING.

O subconjunto de dados espaciais é composto por: hidrografia e curvas de nível em escala 1:10.000 com equidistância de 10 m (dados pertencentes à Prefeitura Municipal de Petrópolis); mapa de uso e cobertura do solo em escala 1:50.000 (APA Petrópolis); e localização das estações de controle existentes na bacia de estudo (CPRM). O mapa de uso e cobertura do solo com a localização das estações é apresentado na Figura 3.2. Este mapa foi confeccionada originalmente em escala 1:10.000 pela APA Petrópolis e está

disponível gratuitamente no site da Secretaria Municipal do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da Prefeitura Municipal de Petrópolis (PMP.SMMADS, 2008).

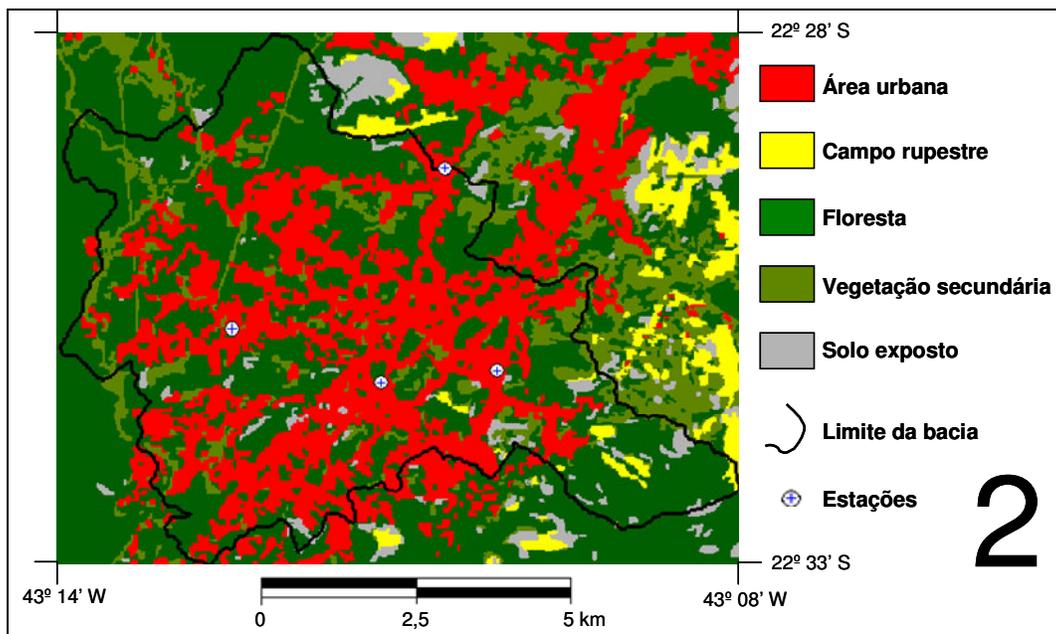


Figura 3.2 – Uso e cobertura do solo com a localização das estações.

Os dados hidrológicos utilizados são oriundos de três estações que coletam dados pluviométricos e executam medidas do nível da água, também chamadas de cotas fluviométricas ou medidas linimétricas. As estações disponíveis na bacia de estudo com a rede de drenagem são ilustradas na Figura 3.3 com os limites da área de contribuição à montante. Acompanhado dos nomes das estações, a Figura 3.3 informa também o nome do rio de cada sub-bacia. Das quatro estações existentes, apenas as estações Liceu Carlos Chagas, Esperança e Morin foram utilizadas neste trabalho. Os dados da estação Petrópolis não puderam ser aproveitados por apresentarem problemas no sistema de medidas linimétricas.

A estação Liceu Carlos Chagas possui medidas horárias de chuva e de cota. As estações Esperança e Morin dispõem de medidas pluviométricas e linimétricas a cada 30 minutos.

Ressalta-se que os dados hidrológicos utilizados foram cedidos pela CPRM (Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais) da cidade do Rio de Janeiro e até então nunca haviam sido utilizados. Dada a recente organização dos dados pela CPRM, alguns períodos não puderam ser aproveitados por apresentarem problemas, como cotas fluviométricas nulas ou negativas e medidas sem a informação de data e hora. Salienta-se ainda que até o momento da concessão dos dados, a CPRM não dispunha da função para a conversão dos níveis de água para as respectivas vazões (curva chave). Por esta razão, apenas as medidas linimétricas são utilizadas neste trabalho, considerando-se que quanto maior a cota, maior a vazão apresentada pelo curso d'água.



Figura 3.3 – Estações pluviométricas/fluviométricas com sub-bacias e drenagens.

As medidas de cotas fluviométricas são baseadas em um referencial arbitrário e não correspondem exatamente à altura contada a partir do leito do rio. Sendo assim, tais medidas possuem valor relativo, indicando apenas a variação do nível da água no canal onde estão instaladas.

Os dados hidrológicos para as três estações estavam dispostos na forma de cota fluviométrica e chuva acumulada para cada intervalo de tempo (a cada 1 hora ou 30 minutos). No entanto, a utilização dos dados no modelo se deu com a cota média de

cada dia e a chuva total diária. Para a discretização das medidas de cota para o passo diário, calculou-se a média das cotas para cada dia. Para as medidas de chuva, foi tomada apenas a última medida do dia, por se tratar de valores acumulados.

3.3 Modelo hidrológico utilizado

O modelo hidrológico utilizado no presente trabalho baseou-se no modelo de Curva Número do *Soil Conservation Service* (CN-SCS), descrito na Seção 2.2. A distribuição da vazão no tempo foi aproximada por um hidrograma triangular para o cálculo da vazão de pico e vazão diária. A aplicação do modelo foi realizada de forma distribuída, utilizando o *TerraME* em um espaço celular de um banco de dados *TerraView*.

3.4 Metodologia

A implementação do modelo hidrológico foi realizada nas seguintes etapas:

3.4.1 Organização e geração dos dados espaciais

Os dados espaciais iniciais foram primeiramente armazenados em um banco de dados do sistema SPRING. A partir daí, utilizaram-se as curvas de nível em escala 1:10.000 para a geração de uma rede irregular de triângulos (TIN) e posterior geração de uma grade regular de altitudes com resolução de 30 m. Gerou-se também, uma grade com a declividade do respectivo DEM. A definição do espaçamento do DEM foi baseada em ISM (1999), que recomenda a resolução de um DEM em formato de grade regular como $3 \text{ mm} \times \text{DEsc}$ ou $4 \text{ mm} \times \text{DEsc}$ onde DEsc é o denominador da escala de um mapeamento de curvas de nível.

O DEM gerado pelo sistema SPRING foi processado no *software* HAND para a geração do DEM corrigido, da grade LDD, da grade acumulada e para a extração das sub-bacias e da bacia de estudo. A codificação dos sentidos de fluxo pela grade LDD gerada pelo *software* HAND não é a mesma utilizada pelo SPRING, conforme ilustra a Figura 3.4. Apesar dos dados terem sido gerados pelo HAND, optou-se por convertê-los para a codificação do sistema Spring, por ser mais didática e de mais fácil compreensão.

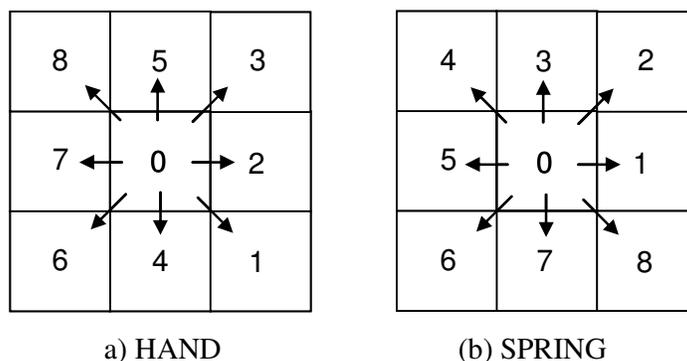


Figura 3.4 – Codificação LDD gerada pelo HAND (a) e pelo SPRING (b).

Com a codificação da Figura 3.4(b), a grade LDD foi importada para o SPRING. Importou-se ainda a grade acumulada e os limites da bacia de estudo com as sub-bacias.

Sendo assim, o banco de dados SPRING conta com as seguintes variáveis expostas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Variáveis do Banco de Dados SPRING.

GRADES NUMÉRICAS	DADOS TEMÁTICOS E CADASTRAIS
Grade Altimétrica	Estações pluviométricas / fluviométricas
Declividade	Uso e ocupação do solo
Grade LDD	Limites da bacia e sub-bacias
Grade Acumulada	_____

Vale observar que os dados numéricos foram recortados com o polígono de limite da bacia obtido pelo HAND. Sendo assim, os dados numéricos representam apenas as células do interior da bacia hidrográfica.

3.4.2 Construção do Banco de Dados *TerraView*

Os dados apresentados na Tabela 3.1 foram todos inseridos em um banco de dados do *software TerraView* 3.1.4. A partir do limite da bacia principal, um espaço celular com espaçamento de 30 m foi gerado, resultando em um total de 52.820 células.

Uma vez criado o espaço celular, foi necessário preencher as células com os atributos a serem utilizados como dados de entrada na implementação do modelo hidrológico. Para

o preenchimento do atributo que define a classe de uso do solo, utilizou-se o *plugin* de preenchimento de células do *TerraView* disponível em Aguiar et al. (2007). No entanto, tal *plugin* é compatível apenas com a versão 3.2.0 RC1 do *TerraView*. Sendo assim, converteu-se o banco de dados para a devida versão, aplicou-se o *plugin* de preenchimento de células, e a tabela com o atributo preenchido foi exportada para posterior importação e associação com a tabela de atributos do espaço celular do banco de dados *TerraView* 3.1.4.

Para os dados numéricos (grade LDD, grade acumulada e declividade), não foi possível utilizar o *plugin* de preenchimento de células, uma vez que este *plugin* não é capaz de atribuir valores pelo método do vizinho mais próximo, ou seja, não é possível associar o valor exato da grade numérica a um atributo do espaço celular. Sendo assim, os dados numéricos foram atribuídos às células por meio de associação com uma tabela externa.

Com os valores devidamente atribuídos, o espaço celular ficou estruturado inicialmente com os atributos descritos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Atributos iniciais do espaço celular.

ATRIBUTO	TIPO	DESCRIÇÃO
object_id_	String	Identificador da célula
Col	Inteiro	Posicionamento em coluna da célula
Lin	Inteiro	Posicionamento em linha da célula
LDD	Inteiro	Direção LDD entre 1 e 8
ACUM	Inteiro longo	Valor da grade acumulada, entre 1 e 52.820
DECLIV	Real	Declividade da célula em porcentagem
VIS	Inteiro	Valor da classe de uso do solo

3.4.3 Implementação do modelo hidrológico distribuído

Com o banco de dados *TerraView* 3.1.4 devidamente estruturado e o espaço celular com todos os atributos necessários para a aplicação do modelo CN-SCS, o modelo

hidrológico distribuído foi implementado com o *TerraME* 0.1 em ambiente Eclipse SDK 3.2.2.

Comparado ao modelo concentrado, a aplicação do modelo hidrológico distribuído do SCS apresenta algumas peculiaridades. A primeira delas, inerente a qualquer modelo hidrológico distribuído, é que os resultados são obtidos para cada elemento do espaço celular, de modo a proporcionar uma visão distribuída do modelo em toda a bacia.

Para o caso distribuído, faz-se necessário calcular o valor de CN médio e a declividade média da área à montante de cada célula. Para este cálculo foi necessário utilizar os valores da grade acumulada (ACUM) para acumular os valores de CN e de declividade. A soma de valores acumulados ao longo da bacia deve ser feita em uma ordem específica, de modo a acumular os valores de interesse. Para isso, foi utilizada a função *SpatialIterator*, a fim de definir a trajetória de varredura do espaço celular. A trajetória foi definida pela ordem da grade acumulada, ou seja, dos menores para os maiores valores de ACUM. Os valores acumulados são divididos pelo valor de ACUM para o cálculo do CN médio e declividade média.

A ordem de varredura também se faz importante para o cálculo do comprimento hidráulico, presente na Equação 2.8. Para cada célula, foi necessário calcular o comprimento do maior caminho percorrido pela água na área de contribuição. Este cálculo exige sua execução na mesma ordem da grade acumulada. Ressalta-se ainda que o valor a ser somado para o comprimento hidráulico nas direções colaterais deve ser multiplicado por $\sqrt{2}$, considerando que a medida é a diagonal de um quadrado.

O fluxo de execução para a implementação do modelo seguiu basicamente as seguintes etapas para um evento de chuva:

- 1) Calcular o caminho hidráulico e acumular dos valores de CN e declividade;
- 2) Calcular CN médio e declividade média;
- 3) Cálculo das variáveis de tempo, chuva efetiva, vazões de pico e vazão diária.

Vários parâmetros de entrada devem ser definidos no código fonte para a execução do modelo. É necessário definir a resolução das células; os valores de curva número para cada classe; um vetor (tabela em LUA) com valores de chuva em mm e o intervalo de tempo em horas de cada medida; os limites das condições AMC; e a condição AMC inicial para os primeiros cinco dias de chuva. Os valores de Curva Número e os limites das condições AMC foram obtidos por um processo de otimização descrito na seção 3.4.4.

Com relação às funções disponíveis no *TerraME*, utilizou-se a função *ForEachCell* para percorrer o espaço celular. Para o acesso à célula vizinha obtida pelo algoritmo D8, é possível a utilização da função *ForEachNeighbour* a partir de uma vizinhança criada pela função *CreateMooreNeighbourhood*. No entanto, uma vizinhança de Moore possui mais vizinhos do que o necessário, quando o interesse recai em apenas um vizinho para cada célula. Além disso, a criação de uma vizinhança de Moore exigiria uma verificação nos vizinhos de cada célula em busca daquele localizado na posição correspondente à codificação LDD. A fim de solucionar o problema, implementou-se uma função a fim de criar uma vizinhança contendo apenas o vizinho de interesse, ou seja, o vizinho localizado em uma das oito possíveis posições de acordo com a codificação LDD. A função que cria tal vizinhança recebeu o nome de *CreateLddNeighbourhood*, cuja implementação é encontrada no código fonte do Apêndice A. A criação de uma vizinhança desse tipo adiciona apenas um vizinho para cada célula.

O acesso ao único vizinho criado poderia ser feito pela função *ForEachNeighbour*. No entanto, optou-se por criar uma função específica para o acesso ao vizinho LDD. A função criada recebeu o nome de *ForLddNeighbour*. Na prática, o resultado desta função é o mesmo que o da função *ForEachNeighbour*, com a vantagem de não utilizar um laço para percorrer todos os vizinhos da célula, uma vez que só há um vizinho. Além disso, o nome da função denota melhor o que é executado pela rotina.

3.4.4 Calibração dos parâmetros do modelo

Com o intuito de verificar o ajuste do modelo de Curva Número do SCS a dados reais, procedeu-se o cálculo do modelo concentrado com dados de chuva e cota média, ambas

diárias, das três estações de controle (Figura 3.3). Além disso, um processo de otimização foi realizado para encontrar os valores dos parâmetros de entrada que melhor se ajustassem aos dados reais.

A aplicação das equações e o processo de otimização foram executados na planilha eletrônica do Microsoft Excel. Na planilha, o modelo concentrado foi aplicado de forma pontual nas três estações de controle e considerando a área de contribuição de cada uma delas. Sendo assim, calculou-se por meio do modelo distribuído, as variáveis necessárias para o cálculo de algumas variáveis, como a proporção de classes de uso e cobertura, declividade média e comprimento hidráulico. Para a otimização dos parâmetros, foi utilizada a ferramenta PopTools, disponível gratuitamente em CSIRO (2007).

É importante observar que os valores de cota não podem ser comparados entre as diferentes estações, e que a relação entre a cota e a vazão real não são necessariamente lineares. Dessa forma, os valores de cota de cada estação foram normalizados entre 0 e 1, assim como o foram os valores estimados de vazão, usando valores mínimos e máximos.

A medida utilizada na avaliação do processo de otimização dos parâmetros foi o erro quadrático entre as cotas médias e as vazões simuladas pelo modelo, ambas normalizadas. Tal valor indica o quanto as vazões simuladas se aproximam das cotas reais. O erro quadrático (ϵ) é calculado por:

$$\epsilon = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (CFn_i - Qn_i)^2 \quad (3.1)$$

onde, CFn_i são as cotas fluviométricas normalizadas;

Qn_i são as vazões diárias calculadas normalizadas;

n é a quantidade de eventos chuvosos; e

N é a quantidade de estações de controle utilizadas na avaliação.

Os valores de Q_n são normalizados com base na vazão média convertida em m^3/s a partir da chuva efetiva calculada em mm.

Em busca de uma melhoria do ajuste entre os valores de cota medidos e a vazão estimada pelo modelo, optou-se por efetuar a correção das cotas fluviométricas devido ao escoamento base. O comportamento do fluxo da água devido à integração do aquífero com o rio é ilustrado na Figura 2.2. No entanto, dado o pequeno tamanho da bacia e o curto intervalo de tempo das chuvas, é possível considerar o escoamento base como uma reta.

As estações de monitoramento efetuam as medidas de cota fluviométrica e de chuva na mesma localização. Como cada estação encontra-se no final de cada sub-bacia, é possível considerar a possibilidade de que as variações do nível da água ocorram não somente em função da chuva medida apenas na estação, mas também em decorrência dos diferentes eventos chuvosos que ocorrem à montante da estação. Assim sendo, em busca de uma chuva mais representativa para a bacia de estudo, foram utilizados pesos para as medidas de chuva de cada estação de modo a compor uma chuva ponderada a ser utilizada como dado de entrada. Desse modo, o valor de chuva Pr_p a ser utilizado como entrada para toda a bacia no processo de calibração é dado por:

$$Pr_p = P_ChuvaLiceu*PrLiceu + P_ChuvaEsp*PrEsp + P_ChuvaMorin*PrMorin \quad (3.2)$$

onde, $P_ChuvaLiceu$, $P_ChuvaEsp$ e $P_ChuvaMorin$ são os pesos para as medidas de precipitação $PrLiceu$, $PrEsp$ e $PrMorin$ respectivamente para as estações Liceu Carlos Chagas, Esperança e Morin.

O processo de calibração dos parâmetros utilizou um método de otimização que consistiu na geração de um número aleatório para cada variável dentro de um determinado intervalo com critérios pré-estabelecidos. Em primeiro lugar, valores iniciais de Curva Número para cada classe foram estabelecidos baseados nas tabelas apresentadas em ASCE (1996). Tais números proporcionaram noções de escala, variação e ordem dos valores de Curva Número para cada classe. Com isso, foram impostas restrições para a construção dos intervalos de geração de números aleatórios

para cada classe. Os valores iniciais de Curva Número atribuídos a cada classe de uso e cobertura do solo constam na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Valores iniciais de Curva Número para as classes de uso e cobertura do solo.

Classe	Curva Número
Área Urbana	95
Campo Rupestre	74
Floresta	70
Vegetação Secundária	76
Solo Exposto	86

Além da ponderação da chuva em cada estação, da correção das cotas pelo fluxo base e dos valores de CN para cada classe, consideraram-se também os limites de chuva para a definição das condições AMC e a constante λ (ou razão Ia/S) como parâmetros a serem otimizados. A Tabela 3.4 apresenta todas as variáveis consideradas no processo de otimização, bem como os limites do primeiro conjunto de intervalos para a geração dos parâmetros a serem introduzidos no modelo.

Além dos valores que definem os limites expressos na Tabela 3.4, são feitas ainda algumas restrições, a saber:

- a) O ordenamento dos valores de CN para as classes de uso e cobertura foi preservado, conforme a Tabela 3.3. Assim, a classe Área Urbana sempre terá um valor de CN maior do que a classe Solo Exposto, que, por sua vez, sempre terá um valor maior que a classe Vegetação Secundária e assim sucessivamente;
- b) O escoamento base de toda a bacia de estudo será sempre maior do que o escoamento base da sub-bacia onde se encontra a estação Esperança, que por sua vez será sempre maior que o escoamento base da sub-bacia da estação Morin. Esta restrição se baseia no fato de que quanto maior a bacia, maior o escoamento base;

- c) A somatória dos pesos para a ponderação das chuvas das estações será sempre igual a 1.

Tabela 3.4 – Intervalos iniciais para a otimização dos parâmetros de entrada do modelo hidrológico.

Parâmetro	Descrição	Limite Inferior	Limite Superior
1) CN_ArUrb	Valor de CN para Área Urbana	80	100
2) CN_Camp	Valor de CN para Campo Rupestre	60	80
3) CN_Floresta	Valor de CN para Floresta	60	80
4) CN_VegSec	Valor de CN para Vegetação Secundária	60	80
5) CN_Solo	Valor de CN para Solo Exposto	70	90
6) Lim_Inf_AMC	Limiar de chuva acumulada nos últimos 5 dias abaixo do qual considera-se AMC I	0	50
7) Lim_Sup_AMC	Limiar de chuva acumulada nos últimos 5 dias acima do qual considera-se AMC III	50	100
8) λ (Ia/S)	Razão entre a absorção inicial e o fator de retenção	0,05	0,3
9) EBase_Liceu	Inclinação da reta do escoamento base da estação Liceu	0	0,5
10) EBase_Esp	Inclinação da reta do escoamento base da estação Esperança	0	0,5
11) EBase_Morin	Inclinação da reta do escoamento base da estação Morin	0	0,5
12) P_ChuvaLiceu	Peso da chuva medida na estação Liceu	0	1
13) P_ChuvaEsp	Peso da chuva medida na estação Esperança	0	1
14) P_ChuvaMorin	Peso da chuva medida na estação Morin	0	1

Definidos inicialmente os limites dos parâmetros constantes na Tabela 3.4, aplica-se a função ALEATÓRIO(), do Microsoft Excel, no intervalo definido para cada parâmetro. Após definida a referida função, que gera um número aleatório da distribuição uniforme, é feita uma simulação pelo método de Monte Carlo, a fim de gerar uma seqüência de números aleatórios nos intervalos especificados. A simulação em questão está disponível na ferramenta PopTools, e sua execução consiste em aplicar a função ALEATÓRIO() tantas vezes quantas forem especificadas.

Uma quantidade de 10.000 valores para cada um dos parâmetros do modelo foram gerados. Cada conjunto de valores simulados é aplicado automaticamente no modelo hidrológico, de modo a produzir um erro quadrático calculado pela Equação 3.1. Desse modo, o resultado da simulação é uma lista com 10.000 linhas e 15 colunas, sendo 14 colunas para os parâmetros e uma coluna para o erro quadrático.

Posteriormente, os 20 conjuntos que apresentaram os menores erros foram selecionados. Para cada parâmetro, calculou-se um novo intervalo com limites de dois desvios-padrões a mais e a menos a partir do valor que apresentou o menor erro. Esses novos limites, mais restritos, são utilizados para realizar uma nova simulação.

Seguindo as mesmas restrições para a definição de novos intervalos, uma nova simulação é executada, e são selecionados novamente vinte conjuntos que apresentaram os menores erros. O desvio-padrão para cada variável é calculado, e novos intervalos são obtidos. Todo o processo se repete até que o intervalo para a geração de valores aleatórios não apresente reduções significativas no erro quadrático.

Toma-se para cada parâmetro o valor de menor erro, resultante da última simulação. Tais números representarão os valores dos parâmetros que melhor ajustam o modelo hidrológico para a obtenção do escoamento superficial.

De modo geral, o processo de otimização dos valores seguiu as seguintes etapas:

- 1) Definição dos intervalos de variação para cada parâmetro de acordo com as restrições impostas;
- 2) Geração de uma seqüência de 10.000 valores contidos nos intervalos definidos para cada parâmetro;
- 3) Execução do modelo para cada conjunto de parâmetros gerados;
- 4) Cálculo do erro quadrático de cada execução do modelo;
- 5) Seleção dos vinte conjuntos de valores que apresentaram os menores erros;

- 6) Cálculo do desvio-padrão (σ) para os vinte valores de cada parâmetro;
- 7) Definição de um novo intervalo para cada parâmetro considerando $\pm 2\sigma$ sobre o valor que apresentou o menor erro e considerando ainda as restrições estabelecidas para a obtenção dos valores dos parâmetros;
- 8) Retorna-se ao passo 2, e todo o processo é repetido, caso os novos intervalos sejam mais restritivos que os anteriores.

As etapas elencadas acima são ilustradas sistematicamente no fluxograma da Figura 3.5.

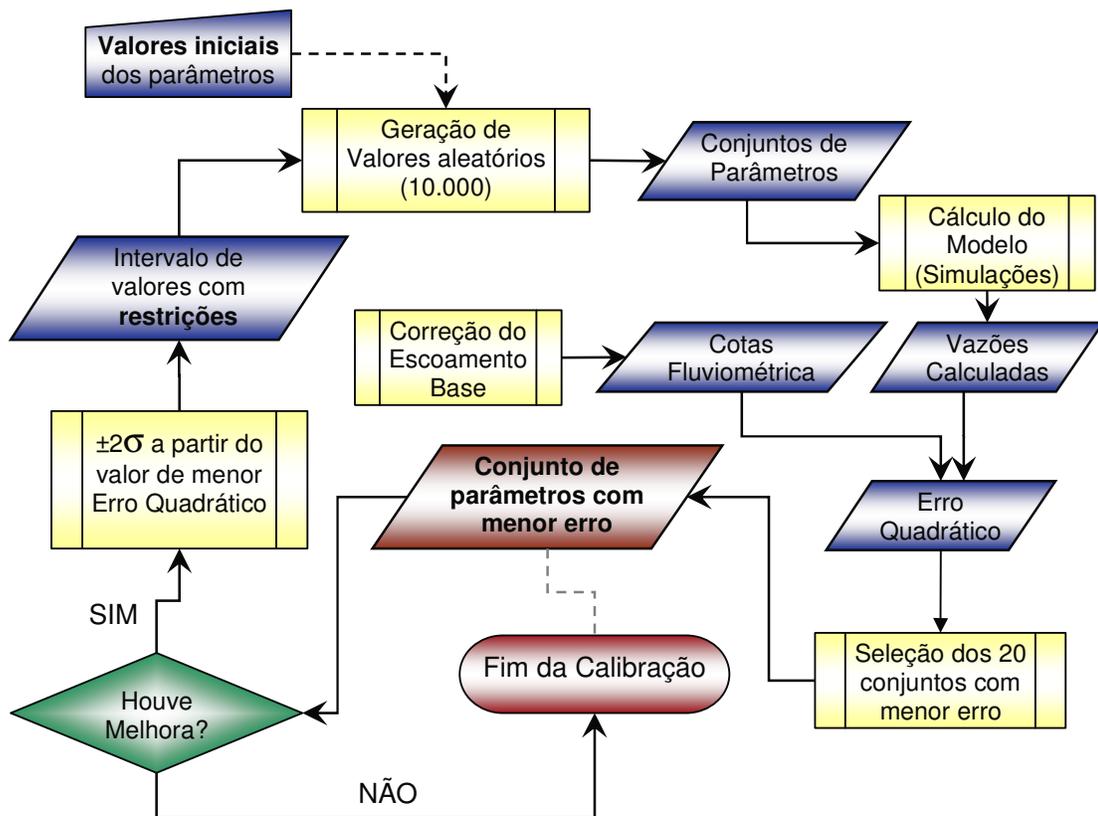


Figura 3.5 – Fluxograma do processo de calibração dos parâmetros

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Parâmetros hidrológicos de entrada

A aplicação do modelo do SCS exige que sejam definidos alguns parâmetros hidrológicos de entrada, como os valores de CN para cada classe de uso e cobertura do solo, os limites das condições AMC e a razão Ia/S (Tabela 3.4). No presente trabalho, optou-se por considerar ainda uma ponderação para as chuvas de cada estação pluviométrica.

Em busca de valores dos parâmetros que, por meio do modelo, melhor reproduzem o escoamento superficial, foi aplicado um processo de calibração, a fim de otimizar os valores dos parâmetros baseado em observações reais de chuva e de cotas fluviométricas. Porém, antes do início do processo, procedeu-se uma análise dos dados hidrológicos, visando identificar a coerência e consistência dos mesmos no período escolhido para a calibração.

4.1.1 Análise dos dados hidrológicos

Os dados hidrológicos utilizados na calibração compreenderam o período de 2 de dezembro de 2007 a 1º de fevereiro de 2008 para as estações Liceu Carlos Chagas, Esperança e Morin. O período foi escolhido por situar-se em uma estação chuvosa, com precipitações significativas, a fim de proporcionar uma melhor análise do escoamento superficial.

Antes do início do processo de calibração, realizou-se uma análise preliminar dos dados hidrológicos. Os gráficos da Figura 4.1 apresentam os dados disponíveis de chuva e cota para as três estações entre os dias utilizados. Nota-se que, em geral, as cotas linimétricas acompanham o comportamento da chuva de maneira proporcional, com o aumento do nível da água nos dias de chuvas mais intensas. É possível perceber também, na zona central dos gráficos, a redução das cotas nos períodos com ausência de precipitação.

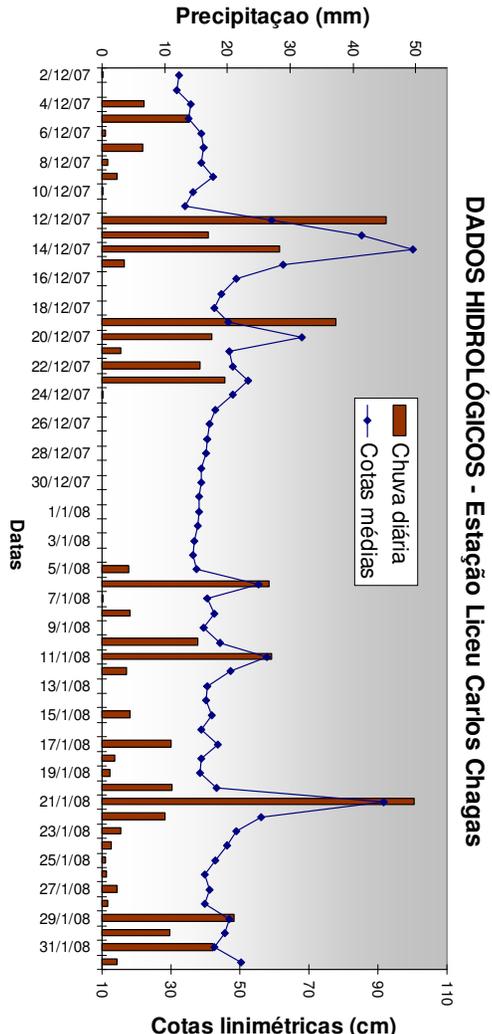
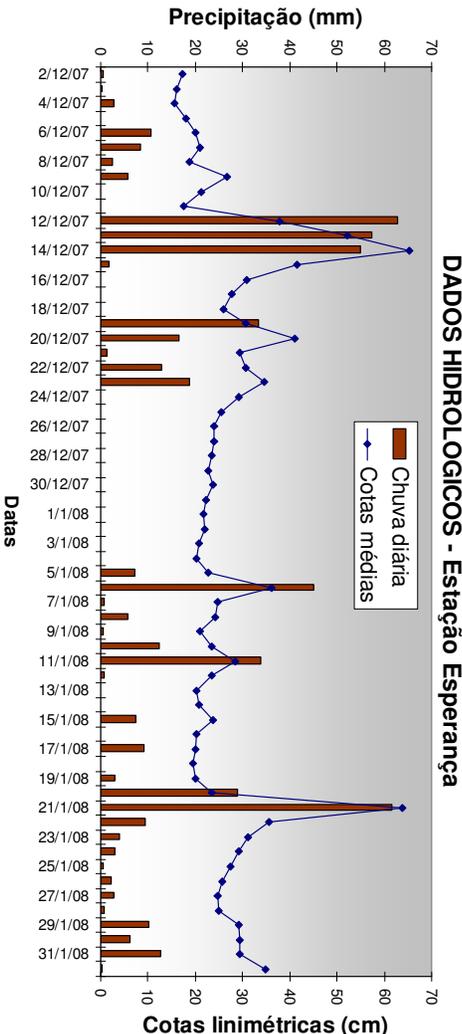
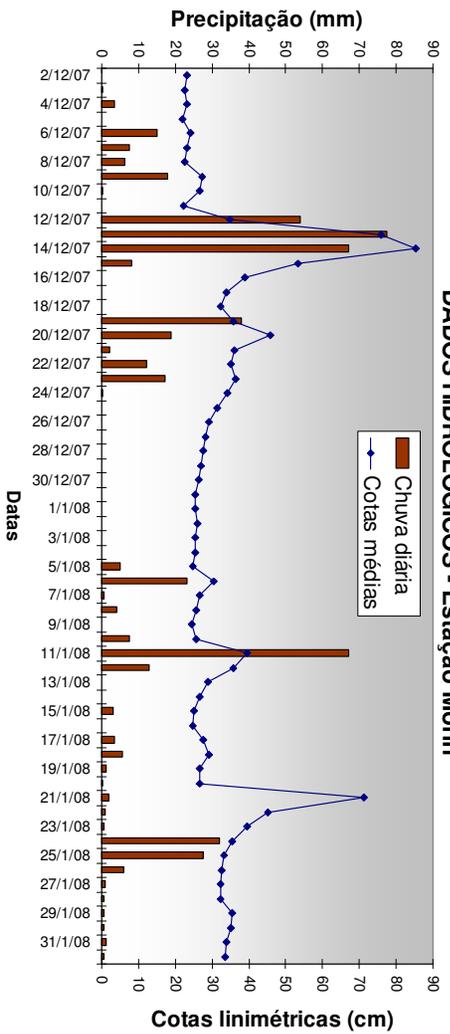


Figura 4.1 – Dados hidrológicos das três estações de monitoramento.

Na estação Liceu Carlos Chagas, o primeiro pico do nível de água ocorre apenas dois dias após uma precipitação mais intensa no dia 12 de dezembro de 2007. Uma possível explicação para esta defasagem é o fato de que a precipitação mensurada na própria estação pouco tenha influenciado o aumento do nível da água, sendo mais expressiva uma chuva que ocorreu posteriormente, à montante do local da medida. Tal fato é verificado nas estações Esperança e Morin, que estão à montante, e apresentaram maiores valores de chuvas. É possível ainda, que o fato se deva à condição menos saturada em que se encontrava o solo, uma vez que nos dias anteriores houve a ocorrência de precipitações com baixa intensidade. Com a chuva mais intensa no dia 12 de dezembro, a superfície tornou-se mais saturada, fazendo com que chuvas de menor intensidade elevassem ainda mais o nível da água.

Uma defasagem semelhante, com um dia de atraso entre a cota fluviométrica e a precipitação ocorre entre os dias 19 e 20 de dezembro de 2007. Em uma análise dos dados horários (ou a cada 30 minutos), constatou-se que ocorreu uma precipitação concentrada nas últimas horas do dia 19, o que ocasionou um aumento do nível da água nas horas seguintes (A Figura 4.2 apresenta o fato para a estação Liceu Carlos Chagas). Porém, como já passava da meia-noite, o aumento de cota foi contado para o dia 20 de dezembro, resultando assim na defasagem observada nos gráficos das três estações. A fim de evitar que este comportamento atípico prejudique a calibração dos parâmetros, os dias 19 e 20 de dezembro de 2007 foram desconsiderados no cálculo do erro quadrático durante o processo de calibração.

No gráfico da estação Morin, observa-se no dia 21 de janeiro de 2008, um súbito aumento na cota fluviométrica sem haver, no entanto, uma precipitação significativa nesta estação. Diante disso, é possível inferir que a chuva responsável por esse aumento tenha ocorrido provavelmente à montante da estação. A conclusão pode ser evidenciada pelas outras duas estações, que apesar de não pertencerem à área de captação da estação Morin, apresentaram precipitações intensas nesse dia. Este é, portanto, um dos motivos pelo qual se optou por considerar uma ponderação para as chuvas das estações.

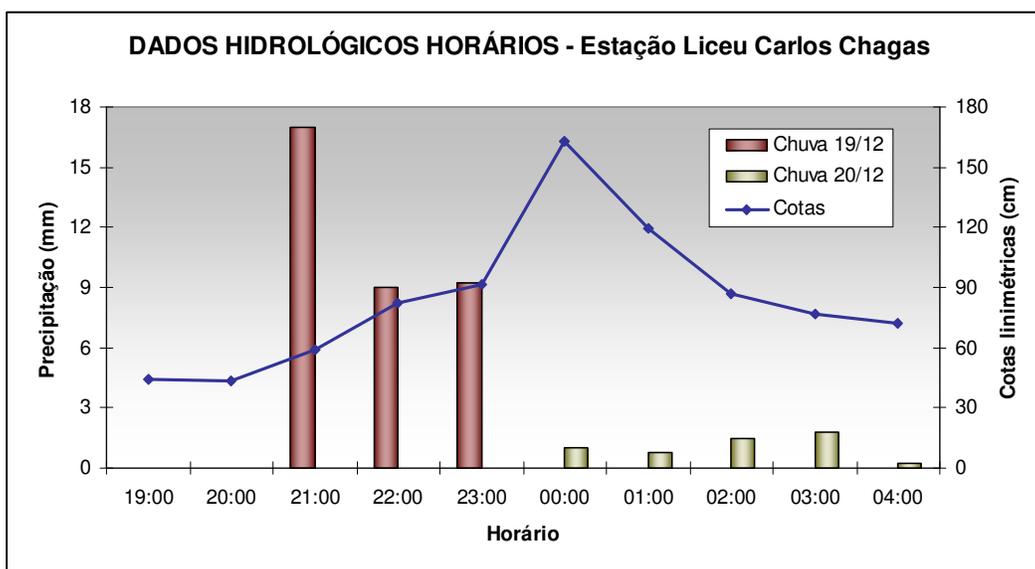


Figura 4.2 – Precipitação e variação do nível da água entre os dias 19 e 20 de dezembro de 2007

A fim de avaliar de maneira preliminar e sucinta os relacionamentos entre os dados hidrológicos das estações, procedeu-se a uma análise da correlação entre os dados. Para isso, foi efetuado o cálculo do coeficiente de correlação de *Pearson* (ρ) entre os conjuntos de dados das estações de controle no período utilizado, cujo resultado consta da Tabela 4.1. O indicativo de ‘Pr’ precedido do nome da estação se refere às medidas de precipitação, ao passo que as letras ‘Ct’ dizem respeito às cotas das respectivas estações.

Tabela 4.1 – Matriz de correlação entre as chuvas e as cotas das três estações.

Correlação	PrLiceu	PrEsp	PrMorin	CtLiceu	CtEsp	CtMorin
PrLiceu	1	0,88	0,58	0,63	0,66	0,54
PrEsp	0,88	1	0,74	0,79	0,75	0,67
PrMorin	0,58	0,74	1	0,65	0,57	0,60
CtLiceu	0,63	0,79	0,65	1	0,97	0,96
CtEsp	0,66	0,75	0,57	0,97	1	0,94
CtMorin	0,54	0,67	0,60	0,96	0,94	1

Para as cotas, nota-se uma alta correlação entre as três estações com coeficientes acima de 0,94, demonstrando um comportamento padrão do nível dos cursos d'água da bacia. Dentre as medidas de precipitação, as coletadas na estação Morin são as que apresentam menor correlação com as precipitações nas outras duas estações, o que evidencia um regime de chuvas menos semelhante ao das outras duas áreas, principalmente ao da saída da bacia.

É interessante analisar os valores de correlação entre as chuvas e as cotas das estações. Observa-se que as medidas de precipitação da estação Esperança é a que mais se correlaciona com cotas linimétricas de todas as estações. Em uma primeira análise da situação, seria possível afirmar que a chuva da estação Esperança possui maior influência na variação do nível dos rios nas outras estações. Contudo, o coeficiente de correlação apresentado na Tabela 4.1 indica o ajuste de um conjunto de dados com relação a outro de maneira linear, e, não obstante, o relacionamento entre precipitação e cota linimétrica não se dá de maneira linear.

4.1.2 Otimização dos valores para os parâmetros de entrada

A partir de dados reais de chuva e medidas linimétricas, foi executada a calibração dos parâmetros do modelo pelo método de otimização descrito na seção 3.4.4. Da execução do processo, foram obtidos para os parâmetros os valores expressos na Tabela 4.2. O erro quadrático calculado pela Equação 3.1 foi de 1,8037.

Tabela 4.2 – Valores otimizados para os parâmetros do modelo hidrológico do SCS.

PARÂMETRO	VALOR	PARÂMETRO	VALOR
1) CN_ArUrb	97,38283	8) λ (l/s)	0,05048
2) CN_Camp	74,38872	9) EBase_Liceu	0,149 mm/dia
3) CN_Floresta	69,92489	10) EBase_Esp	0,088 mm/dia
4) CN_VegSec	76,87716	11) EBase_Morin	0,067 mm/dia
5) CN_Solo	83,97503	12) P_ChuvaLiceu	0,610
6) Lim_Inf_AMC	20,28 mm	13) P_ChuvaEsp	0,355
7) Lim_Sup_AMC	52,94 mm	14) P_ChuvaMorin	0,035

Os valores de CN obtidos pelo processo de calibração para as cinco classes de uso e cobertura do solo apresentaram pequenas diferenças com relação aos valores tabelados inicialmente propostos (Tabela 3.3), com a maior diferença sendo inferior a três unidades.

O mesmo ocorreu com o limite de chuva acumulada nos últimos cinco dias que separa a condição AMC II da AMC III (Lim_Sup_AMC, inicialmente proposto como 53 mm). No entanto, o limite entre as condições AMC I e AMC II (Lim_Inf_AMC) ficou abaixo do valor inicial utilizado de 36 mm, fazendo com que o solo passasse da condição seca para a condição intermediária com uma chuva menos intensa.

A razão I_a/S convergiu praticamente para o valor de 0,05 proposto por Woodward et al. (2003) e corroborado por Baltas et al. (2007). Este valor, bem abaixo de 0,2 proposto no método clássico, resulta em uma baixa absorção inicial do solo. Quanto menor o valor desta constante, menor o valor de I_a , que condiciona a equação (2.4) para o cálculo da precipitação efetiva, fazendo com que volume de água escoado superficialmente seja mais sensível às precipitações. O baixo valor da razão I_a/S pode estar relacionado à distribuição espacial dos valores de CN, que não é explícita no modelo SCS, uma vez que este modelo não utiliza individualmente o valor de CN de cada ponto, mas faz uso de um valor médio à montante.

O escoamento base obtido foi utilizado na correção das cotas fluviométricas para o processo de otimização, por conta da integração do aquífero com o rio. A obtenção dos valores para as três estações seguiu o critério de que as menores sub-bacias devem ter escoamento base menor do que as maiores. A Figura 4.3 apresenta as cotas fluviométricas das três estações acompanhadas de seus respectivos escoamentos de base. Apesar de os valores de cotas linimétricas não serem comparáveis entre as estações, nota-se em todas elas o mesmo padrão, confirmando os altos valores de correlação entre as cotas apresentados na Tabela 4.1. O ajuste do escoamento base às cotas demonstrou coerência, uma vez que ocorre sempre abaixo dos mínimos locais, aumentando gradativamente com os mesmos.

Com relação aos pesos das medidas de chuva para as estações de monitoramento, a da estação Liceu foi a que apresentou maior influência, com um peso maior do que 60%, seguido pela estação Esperança, com 35,5%. A chuva medida na estação Morin participa com pouca influência na modelagem e convergiu para um peso de apenas 3,5%. É interessante comparar este resultado com os valores de correlação linear entre as chuvas e as cotas fluviométricas das estações expressos na Tabela 4.1. Na referida tabela, observa-se que a chuva da estação Esperança é a que apresenta o maior valor de correlação linear para as cotas de todas as estações. No entanto, como as relações entre chuva e cota não são lineares, a maior influência não foi da estação Esperança, mas da estação Liceu Carlos Chagas. Isso mostra que a medida de chuva coletada em um ponto apenas nem sempre modela com exatidão o escoamento superficial naquele ponto, uma vez que a água ali escoada é função de uma precipitação ocorrida à montante do mesmo, a qual não se tem a medida.

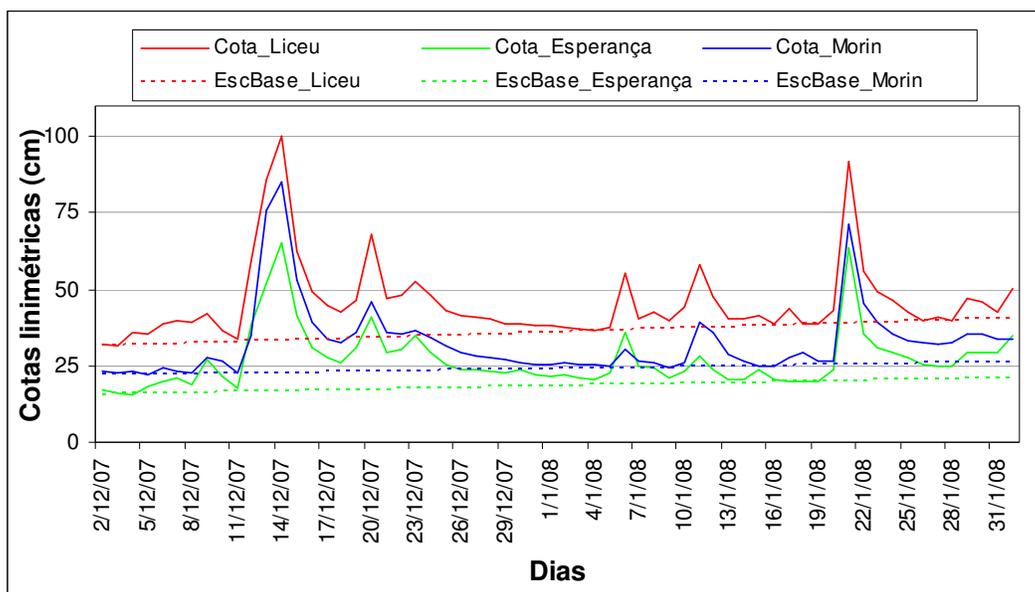


Figura 4.3 – Cotas médias seguidas do escoamento base para as três estações.

O maior peso na estação Liceu Carlos Chagas pode ser explicado analisando-se o mapa da Figura 3.3. Em virtude do formato da bacia e da distribuição das estações, parte da área de contribuição da estação Esperança encontra-se mais próxima à estação Liceu.

Dessa maneira, o escoamento superficial que ocorre na estação Esperança fica mais sujeito às chuvas que ocorrem nas áreas mais próximas à estação Liceu.

Com os parâmetros devidamente calibrados, os valores encontrados foram utilizados para a aplicação pontual do modelo do SCS na localização das três estações de monitoramento. Os gráficos da Figura 4.4 apresentam a variação do nível da água em valores normalizados com a vazão média diária estimada em m^3/s .

Analisando a ordem de grandeza da vazão para as três estações, nota-se uma clara coerência. Os maiores valores são obtidos para as maiores áreas de contribuição. A área de contribuição da estação Liceu Carlos Chagas compreende toda a bacia e, por isso, apresenta os maiores valores de vazão média diária, com um valor máximo de $14,4 m^3/s$ no período analisado. A estação Morin, com uma área de contribuição quase sete vezes menor, apresentou um valor máximo da ordem de $1,9 m^3/s$ no período analisado, aproximadamente sete vezes menor do que a vazão máxima encontrada na estação Liceu, mantendo assim, a mesma proporção.

As curvas de vazão e cota não são coincidentes, uma vez que se trata de diferentes ordens de grandeza. Entretanto, é possível perceber que o ordenamento se manteve com as maiores cotas relacionadas às maiores vazões. O único pico de cota não reproduzido exatamente pela vazão estimada é o do dia 20 de dezembro, por conta da ocorrência de chuva próxima à meia-noite do dia 19 de dezembro.

É interessante comparar os gráficos da estação Liceu Carlos Chagas dispostos nas Figuras 4.1 e 4.4. No primeiro, observa-se no dia 12 de dezembro, o segundo maior valor de precipitação no período analisado, sem apresentar, no entanto, um aumento significativo na cota fluviométrica. Tal aumento somente é observado dois dias depois, com chuvas menos intensas.

Analisando o gráfico da referida estação na Figura 4.4, percebe-se que a vazão estimada acompanhou o comportamento do nível da água nesses dias. Conforme já se esperava, a explicação para tal fato é a condição de umidade prévia do solo.

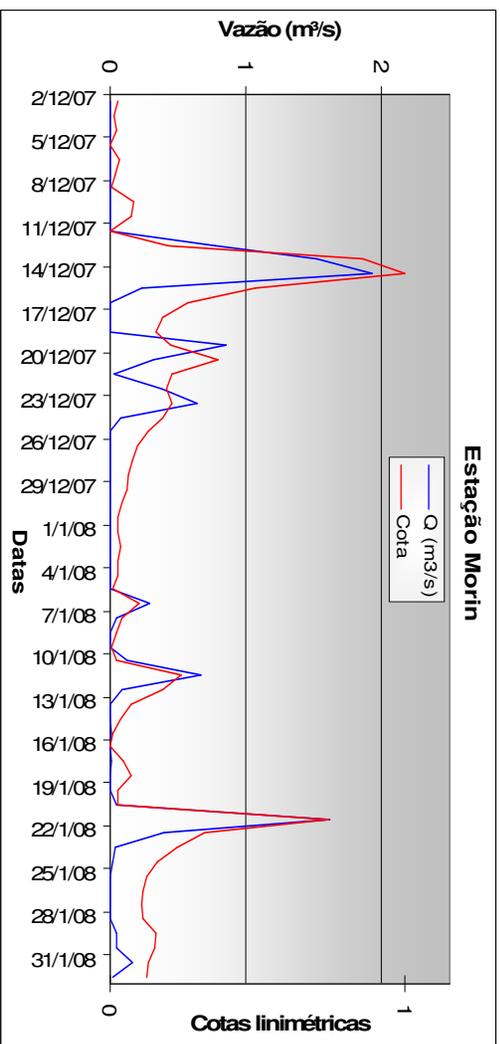
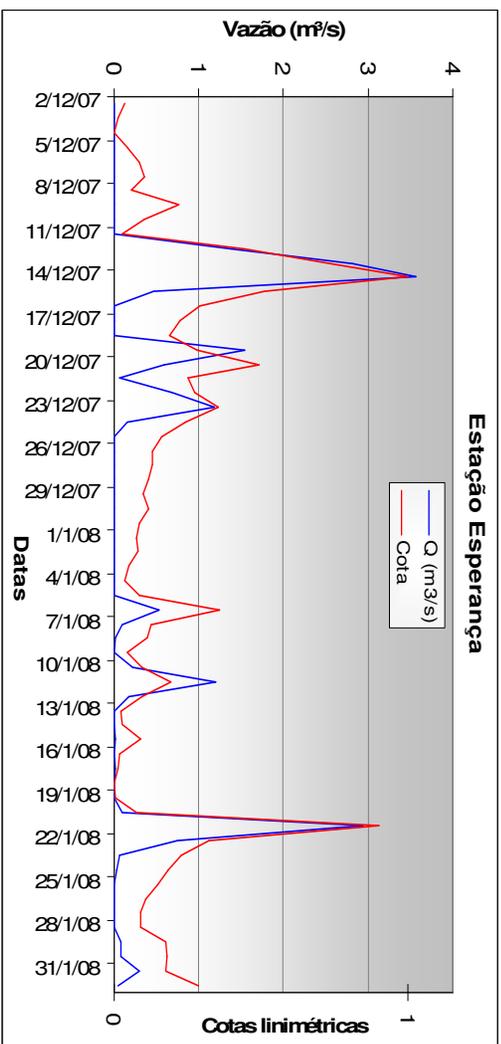
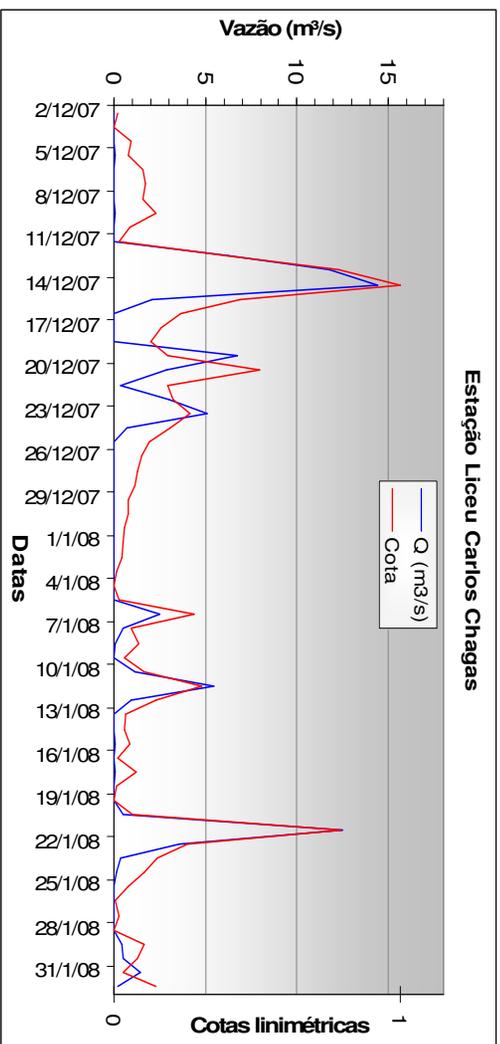


Figura 4.4 – Vazões estimadas e cotas normalizadas para as três estações.

No dia 12 de dezembro, devido às chuvas pouco intensas e a ausência de precipitação no dia anterior, o solo se encontrava na condição AMC 1, com um alto fator de retenção e restringindo o escoamento superficial. Por isso, a precipitação do dia 12, mesmo com um valor alto, não foi suficiente para produzir um escoamento superficial que representasse um máximo local. Com a chuva intensa no dia 12, o valor de precipitação acumulada fez com que o solo ficasse saturado e passasse para condição AMC 3 nos dias seguintes, com um menor fator de retenção, facilitando assim, o escoamento superficial. Por esta razão, chuvas menos intensas nos dias 13 e 14 de dezembro resultaram em maiores valores de vazão.

No gráfico da estação Morin, na Figura 4.4, percebe-se a importância da utilização de uma chuva ponderada. Como já constatado na Figura 4.1, no dia 21 de janeiro de 2008, o nível do curso d'água apresenta um aumento súbito, no entanto, sem nenhuma ocorrência de precipitação registrada na estação. Com a chuva ponderada, foi possível utilizar a chuva de outras estações, de modo a modelar a precipitação efetiva na estação Morin e reproduzir, com a medida de vazão, o comportamento do nível da água.

Ressalta-se que o processo de calibração do modelo utilizou o erro quadrático calculado pela Equação 3.1 como medida de avaliação. O cálculo desta medida leva em conta a vazão normalizada diária, ou seja, o volume de água escoado em um dia convertido para uma vazão média em 24 h. O passo diário é empregado, uma vez que as medidas de chuva são utilizadas com o intervalo de tempo de 24 h. A distribuição da água escoada no tempo tem implicação no cálculo do volume diário para os casos em que o tempo base calculado ultrapassa o intervalo de tempo das medidas utilizadas. No método de Curva Número do SCS, apenas três valores para o tempo base são obtidos para um ponto, sendo um para cada condição AMC. Para o ponto de saída da bacia de teste utilizada neste trabalho, os valores foram 35,73 h, 34,38 h, 35,73 h para as condições AMC 1, 2 e 3 respectivamente. O fato de os tempos excederem o intervalo de 24 h utilizado para as medidas de chuva, exige que o volume de água restante em um dia seja somado ao volume escoado do dia seguinte. Neste caso, o volume restante é calculado pela Equação 2.12 com base no hidrograma da Figura 2.4.

4.1.3 Validação

A fim de validar os parâmetros obtidos pelo processo de otimização, um novo conjunto de dados foi selecionado para a aplicação do modelo hidrológico do SCS. O cálculo do modelo e a comparação com as cotas deram-se apenas para a estação Liceu Carlos Chagas. No entanto, os dados de precipitação das outras duas estações também foram utilizados para o cálculo da precipitação ponderada.

O período escolhido para a validação compreendeu o intervalo entre os dias 2 e 14 de fevereiro de 2008. A ocorrência de precipitações mais freqüentes e intensas, comparada aos outros meses do ano, foi o motivo da seleção deste período. Além disso, considerando a estação chuvosa, este era o único período em que se dispunha de dados hidrológicos, além daqueles utilizados no processo de otimização.

Os resultados obtidos para o período de validação com os parâmetros da Tabela 4.2 são apresentados no gráfico da Figura 4.5. Observa-se que as vazões estimadas reproduziram o comportamento do nível da água com os maiores valores associados às maiores cotas.

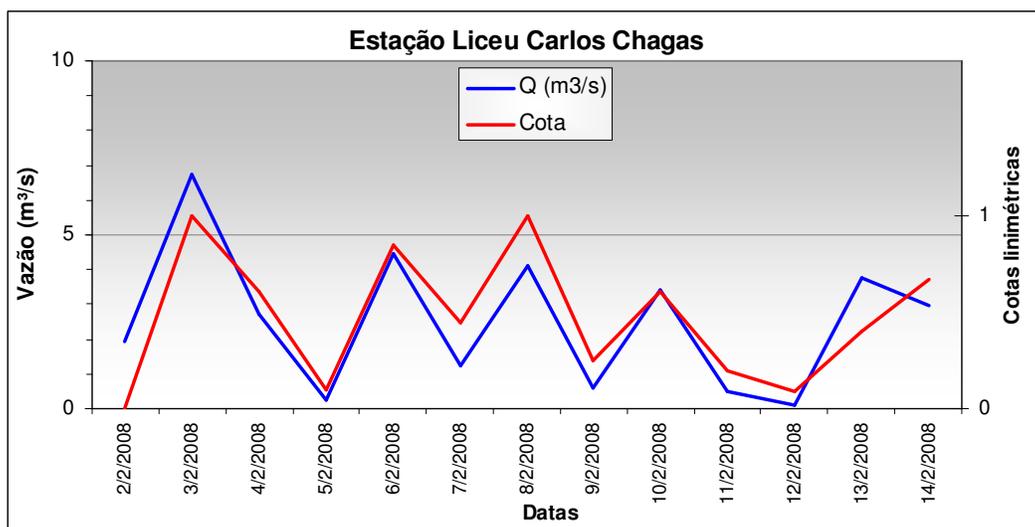


Figura 4.5 – Vazões estimadas e cotas normalizadas para a estação Liceu no período de 2 a 14 de fevereiro de 2008.

Os valores de vazão calculados não podem ser diretamente comparados com as cotas linimétricas, uma vez que representam diferentes grandezas físicas e possuem unidades distintas. Tal comparação somente seria possível, caso se dispusesse dos valores de cotas fluviométricas transformados em vazão. Por essa razão, as cotas linimétricas são apresentadas na Figura 4.4 e 4.5 com valores normalizados. Ainda assim, é possível concluir que o modelo hidrológico do SCS com os parâmetros calibrados pelo processo de otimização foi capaz de reproduzir as variações de vazão com o mesmo padrão das variações de nível do curso d'água.

4.2 Modelo distribuído

Os parâmetros obtidos na calibração foram utilizados para a aplicação do modelo hidrológico distribuído no *TerraME* em todo o período utilizado na calibração. Para a apresentação dos resultados, selecionou-se uma seqüência de três dias de precipitação, para os quais são ilustrados o volume diário escoado em cada célula com o gráfico da distribuição da vazão no tempo para a saída da bacia. Os dias escolhidos foram os dias 12, 13 e 14 de dezembro de 2007, pelo fato de o dia 14 apresentar o maior volume de água escoado em todo o período de análise.

A representação do modelo hidrológico distribuído para os três dias citados, acompanhada do respectivo hidrograma para o ponto de saída da bacia é exposta na Figura 4.6. Os valores do modelo distribuído foram calculados em volume de água escoado para cada dia e são representados na Figura 4.6 em m³. A representação de tais valores é feita com o uso de cores, sendo estes classificados em uma escala logarítmica para uma melhor visualização.

A visualização do volume de água escoado, com a representação de cores na escala logarítmica, proporciona uma visão geral das linhas de fluxo em toda a bacia. A visualização também possibilita uma quantificação da resposta do escoamento superficial a um dado evento chuvoso para toda a bacia.

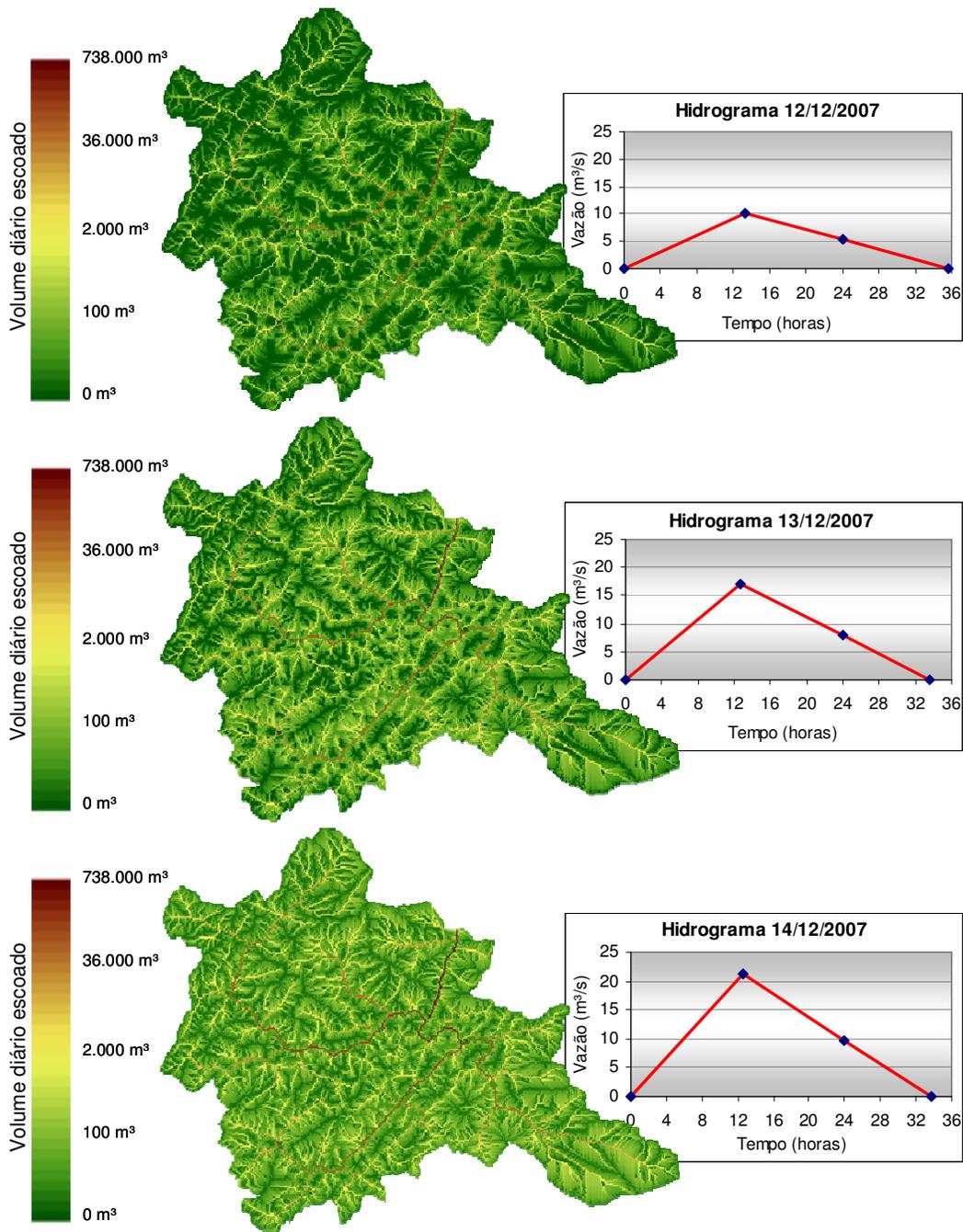


Figura 4.6 – Representação do modelo hidrológico distribuído com o respectivo hidrograma do ponto de saída da bacia para os dias 12, 13 e 14 de dezembro de 2008.

O volume de água escoado em um dia considera o volume de água restante do dia anterior, quando o tempo base ultrapassa o intervalo de tempo do dado de entrada. Quando o tempo base for maior do que o intervalo de tempo das medidas de precipitação, o algoritmo implementado calcula a água restante do escoamento em Δt e adiciona ao escoamento superficial do tempo seguinte, proporcionando assim o caráter dinâmico do modelo.

Para cada elemento do espaço celular existe um hidrograma que descreve a distribuição da vazão no ponto ao longo do tempo. Na Figura 4.6 optou-se por representar apenas o hidrograma do ponto de saída da bacia.

Os valores de chuva ponderada, utilizados como entrada no modelo foram: 51,77 mm, 33,50 mm e 39,11 mm respectivamente para os dias 12, 13 e 14. Apesar do dia 12 contar com o maior valor de chuva, a condição AMC neste dia era a condição 1, resultando em um menor escoamento superficial para toda a bacia. Nos dias 13 e 14, a AMC passou para a condição 3, fazendo com que valores mais altos de escoamento superficial fossem obtidos.

Observando-se os hidrogramas da Figura 4.6, percebe-se a variação do tempo de base em função da condição AMC. Para o dia 12, com condição 1, o tempo base é maior do que para os dias 13 e 14, que possuem condição AMC 3. Com o aumento do volume escoado, tem-se uma maior área do hidrograma e conseqüentemente uma maior vazão de pico. Caso fossem conhecidas as vazões máximas suportadas por cada célula, seria possível obter, com base na vazão de pico calculada, o volume excedente de água que poderia se transformar em uma enchente.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O propósito deste trabalho foi a implementação de um modelo hidrológico dinâmico distribuído para a estimativa do escoamento superficial a partir de um evento chuvoso em uma microbacia urbana. O modelo de Curva Número do SCS foi utilizado com parâmetros otimizados por um processo de calibração e posteriormente validados. A implementação foi feita sobre um espaço celular a partir da plataforma livre *TerraME* para modelagem dinâmica espacial, com rotinas específicas para esse tipo de estrutura de dados.

O modelo hidrológico, devidamente calibrado e validado com dados reais, foi capaz de reproduzir o padrão de variação do nível da água. Uma vez que não se dispunha dos dados de vazão, a avaliação ficou limitada ao fato das vazões estimadas reproduzirem apenas o comportamento das cotas linimétricas, principalmente com relação aos picos de escoamento.

Com base em uma comparação entre os dados de precipitação utilizados como entrada e os resultados de vazão obtidos, foi observada a influência das condições AMC na modelagem do escoamento superficial. Notou-se que com a variação da condição AMC, uma precipitação mais intensa do que outra não implica necessariamente um maior escoamento superficial.

O uso de uma precipitação ponderada pelas três estações para ser utilizada como entrada no modelo se mostrou importante, uma vez que a medida de precipitação é pontual, feita apenas na estação. A ponderação visou reproduzir um valor de precipitação mais representativo para as células à montante das estações. O bom desempenho desse procedimento pode ser verificado pela estação Morin, que, em determinado dia, apresentou um aumento súbito na cota linimétrica, no entanto, sem nenhuma precipitação registrada na estação. Esta variação do nível da água foi modelada com o uso da chuva ponderada.

A visualização dos resultados do modelo distribuído permitiu uma melhor caracterização da bacia, com as linhas de fluxo bem definidas, trazendo consigo a

variação do volume de água escoado. Tal visualização foi possível com a aplicação de uma escala logarítmica para a classificação dos valores em cores. Além disso, o modelo distribuído permite, com a vazão máxima calculada em cada célula, a estimativa do volume de água excedente, caso seja conhecida a vazão máxima suportada pelo ponto.

Em se tratando da organização dos dados para a aplicação do modelo distribuído, a principal dificuldade encontrada na utilização da estrutura para o funcionamento do *framework TerraME* foi o preenchimento do espaço celular com os valores dos atributos. O aplicativo *TerraView* ainda não dispõe de um *plugin* para o preenchimento do espaço celular de modo a reproduzir exatamente uma grade regular de entrada com a mesma resolução do espaço celular. Uma possível solução seria adicionar ao *plugin* de preenchimento de células, o método de interpolação pelo vizinho mais próximo.

A contribuição principal do presente trabalho é a implementação de um modelo hidrológico distribuído, calibrado e validado, na plataforma de modelagem gratuita *TerraME*, com a expectativa de ampliar o uso do sistema pela comunidade técnico-científica. As rotinas prontas do *framework TerraME* atenderam às demandas para a modelagem hidrológica distribuída do SCS baseado em um espaço celular. A rotina para a criação de apenas um vizinho com base na codificação LDD pode ser utilizada em algoritmos que envolvem processos hidrológicos.

O código implementado possibilita a realização de análises, a fim de explorar melhor a variação dos parâmetros do modelo. Dentre as possibilidades, cita-se como exemplo a realização de simulações com diferentes valores de Curva Número em determinadas localidades da bacia, a fim de avaliar o efeito de diferentes níveis de impermeabilização do solo em algumas áreas específicas.

A limitação existente no código implementado é a distribuição do volume de água escoado em apenas um tempo seguinte, ou seja, para os casos em que $\Delta t < T_b < 2\Delta t$. Quando o tempo base é maior do que o intervalo de tempo das medidas de precipitação, o algoritmo implementado calcula a água restante do escoamento em Δt , e adiciona ao escoamento superficial do tempo seguinte. Sendo assim, o código implementado não

distribui o escoamento para os casos em que a precipitação efetiva leva um tempo maior do que $2\Delta t$ para escoar totalmente, como é exemplificado na Figura 2.5. A princípio, a solução para este problema envolveria a criação prévia de tantas variáveis quantos forem os passos de tempo a serem distribuídas as frações de escoamento. Diante disso, sugere-se, para trabalhos futuros, uma solução para este problema, no intuito de modelar mais precisamente o escoamento superficial.

Várias são as frentes a serem exploradas para trabalhos futuros, a partir do desenvolvido na presente dissertação. Modificações podem ser feitas no modelo com o intuito de incorporar linhas de fluxos de escoamento multidirecionais para cada célula, e ainda, fazer uso de algoritmos genéticos como alternativa ao método de Monte Carlo para a otimização dos parâmetros.

A obtenção da curva chave, para a conversão dos valores de cota em vazão poderia ser realizada a partir de uma série histórica. Os valores reais de vazão proporcionariam uma melhor análise da sensibilidade dos parâmetros no processo de calibração para posterior validação do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A.P.; ANDRADE, P.R.; FERRARI, P.G. **Plugin de preenchimento de células**. São José dos Campos, 2007. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/~anapaula/plugin_celulas/>. Acesso em: 19 dez. 2007.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). **Hydrology handbook**. 2.ed. New York, 1996, 784p. ISBN 0-7844-0138-1.
- ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R. SWRRB -- A watershed scale model for soil and water resources management. In: SINGH, V. P. (Ed.) **Computer Models of Watershed Hydrology**. Highlands Ranch, CO: Water Resources, 1995. ISBN 0-918334-91-8.
- BALTAS, E.A.; DERVOS, N.A.; MIMIKOU, M.A. Technical note: determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. **Hydrology and Earth System Sciences**. v.11, n.6, p.1825-1829. Nov. 2007.
- BAND, L.E. Topography partition of watersheds with digital elevation models. **Water Resources Research**, v.22, n.1, p.15-24, Jan. 1986.
- BRILLY, M.; RUSIAN, S.; VIDMAR, A. Monitoring the impact of urbanisation on the Glinscica stream. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v.31, n.17, p.1089-1096, 2006.
- BROWN, R.G. Effects of precipitation and land use on storm runoff. **Water Resources Bulletin**, v.24, n.2, p.421-426, Apr. 1988.
- BRUN, S.E.; BAND, L.E. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. **Computers, Environment and Urban Systems**, v.24, n.1, p.5-22, Jan. 2000.
- BÜCHELE, B.; KREIBICH, H.; KRON, A.; THIEKEN, A.; IHRINGER, J.; OBERLE, P.; MERZ, B.; NESTMANN, F. Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v.6, n.4, p.485-503, June 2006.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; PEDROSA, B. M.; VINHAS, L.; MONTEIRO, A. M. V.; PAIVA, J. A.; CARVALHO, M. T.; GATTASS, M. TerraLib: technology in support of GIS innovation. In: Workshop Brasileiro de Geoinformática – GEOINFO, 2., 2000, São Paulo, **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2000. p.126-133.
- CAMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computer & Graphics**, v.20, n.3, p.395-403, May-June 1996.
- CARNEIRO, T. G. S. **Nested-ca: a foundation for multiscale modelling of land use and land cover change**. 2006. 107 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Disponível em:

<<http://mtc-m17.sid.inpe.br/rep-/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/01.03.11.57>>. Acesso em: 23 fev. 2007.

CASTRO, A. L. C. **Glossário de defesa civil, estudos de riscos e medicina de desastres**. 2.ed. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento, 1998, 283p.

CHENG, S.; WANG, R. An approach for evaluating the hydrological effects of urbanization and its application. **Hydrological Processes**, v.16, n.7, p.1403-1418, May 2002.

COLLINS, S.H.; MOON, G.C. Algorithms for dense digital terrain models. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.47, n.1, p.71-76, Jan. 1981.

COSTA-CABRAL, M.; BURGESS, S.J. Digital elevation model network (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation contributing and dispersal areas. **Water Resources Research**, v.30, n.6, p.1681-1692, June 1994.

CSIRO - SUSTAINABLE ECOSYSTEMS. **Downloading PopTools**. 2007. Disponível em: <<http://www.cse.csiro.au/poptools/download.htm>>. Acesso em: 30 set. 2008.

FAIRFIELD, J., LEYMARIE, P. Drainage networks from grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v.27, n.5, p.709-717, May 1991.

FREEMAN, T. G. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. **Computers and Geosciences**, v.17, n.3, p.413-422, 1991.

GANDOY-BERNASCONI, W.; PALCIOS-VELEZ, O. Automatic cascade numbering of unit elements in distributed hydrological models. **Journal of Hydrology**, v.112, n.3-4, p.375-393, Jan. 1990.

GEETHA, K.; MISHRA, S.K.; EL-DHO, T.I.; RASTOGI, A.K.; PANDEY, R.P. SCS-CN-based continuous simulation model for hydrologic forecasting. **Water Resources Management**. v.22, n.2, p.165-190, Feb. 2008.

HIPÓLITO, J. R.; PORTELA, M. M. Modelos hidrológicos distribuídos utilizando modelos digitais do relevo do tipo raster e do tipo TIN. In: SILUSBA, Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, n.3., Maputo, 1997. **Proceedings...** Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1997.

HUNDECHA, Y.; BÁRDOSSY, A. Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. **Journal of Hydrology**, v.292, n.1-4, p.281-295, June 2004.

IERUSALIMSKY, R.; FIGUEIREDO, L.H.; FILHO, W.C. Lua - An extensible extension language. **Software: Practice and Experience**, v.26, n.6, p.635-652, June 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Tabela 2245 - Número de municípios que sofreram inundações ou enchentes nos últimos dois anos por fatores agravantes. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2000**. 2000. Disponível em <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=2245&z=p&o=17&i=P>>. Acesso em: 7 Jan. 2007.

INTERNATIONAL SYSTEMAP CORPORATION (ISM). **The fundamentals of digital photogrammetry**. Vancouver, 1999. 80p.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.54, n.11, p.1593-1600, Nov.1988.

JONKMAN, S. N. Global perspectives on loss of human life caused by floods. **Natural Hazards**, v.34, n.2, p.151-175, Feb. 2005.

KANG, S.; PARK, J. I.; SINGH, V. P. Effect of urbanization on runoff characteristics of the On-Cheon stream watershed in Pusan, Korea. **Hydrological Processes**, v.12, n.2, p.351-363, Feb. 1998.

MAGALHÃES, L.P.C. **Modelo integrada para simulação de sistemas hídricos**. 2005. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://www.wp.coc.ufrj.br/teses/mestrado/rh/2005/Teses/MAGALHAES_LP_05_t_M_int.pdf> Acesso em: 5 set. 2008.

MOSQUERA-MACHADO, S.; AHMAD, S. Flood hazard assessment of Atrato river in Colômbia. **Water Resources Management**, v.21, n.3, p.591-609, Mar. 2007.

MISHRA, S.K.; PANDEY, R.P.; JAIN, M.K.; SING, V.P. A rain duration and modified AMC-dependent SCS-CN procedure for long duration rainfall-runoff Events. **Water Resources Management**, v.22, n.7, p.861-876, July 2008.

MISHRA, S.K.; SAHU, R.K.; ELDHO, T.I.; JAIN, M. K. An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology. **Water Resources Management**, v.20, n.5, p.643-660, Oct. 2006.

MISHRA, S.K.; SINGH, V.P. Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number. **Hydrological Processes**, v.18, n.7, p.1291-1313, 2004.

MISHRA, S.K.; SINGH, V.P.; SANSALONE, J. J.; ARAVAMUTHAN, V. A modified SCS-CN method: Characterization and testing. **Water Resources Management**, v.17, n.1, p.37-68, Feb.2003.

MISHRA, S.K.; SING, V.P. Another look at SCS-CN method. **Journal of Hydrologic Engineering**. v.4, n.3, p.257-264, July 1999.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B. Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data. **Water Resources Research**, v.27, n.6, p.1177-1191, June 1991.

MULLIGAN, G. F.; CRAMPTON, J. P. Population growth in the world's largest cities. **Cities**, v.22, n.5, p.365-380, Oct. 2005.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v.28, n.3, p.323-344, Dec. 1984.

O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, v.22, n.5, p.794-804, May 1986.

PANDEY, A.; CHOWDARY, V.M.; MAL, B.C.; DABRAL, P.P. Estimation of runoff for agricultural watershed using SCS curve number and geographic information system. In: Map India Conference. n.6, 2003, New Dehli. **Proceedings...** New Dehli: GIS Development, 2003. Disponível em: <<http://www.gisdevelopment.net/application/agriculture/soil/mi0348.htm>>

PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS. SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (PMP.SMMADS). **Mapa de Vegetação**. Petrópolis, 2006. Disponível em: <http://www.petropolis.rj.gov.br/index.php?url=http%3A//sma.petropolis.rj.gov.br/sma/modules/mastop_publish/%3Fta c%3D102>. Acesso em: 15 set. 2008.

QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v.5, n.1, p.59-79, Jan./Mar.1991.

RENNÓ, C.D.; NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; SOARES, J.V.; HODNETT, M.G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M.J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v.112, n.9, p.3469-3481, Sept. 2008.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. 2003. 158 p. (INPE-10437-TDI/925). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/jeferson/2003/06.10.13.53>>. Acesso em: 13 fev. 2007.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Discretização espacial de bacias hidrográficas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, n.10., Foz do Iguaçu, 2001. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS) **Engineering handbook**: Section 4, Hydrology. Supplement A, Washington: Department of Agriculture, 1957.

SOILLE, P.; GRATIN, P. An efficient algorithm for drainage network extraction on DEMs. **Journal of Visual Communication and Image Representation**, v.5, n.2, p.181-189, June 1994.

STEPHENSON, D. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. **Urban Water**, v.4, n.4, p.423-428, Dec. 2002.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v.33, n.2, p.309-319, Feb. 1997.

TREBY, E. J.; CLARK, M. J.; PRIEST, S. J. Confronting flood risk: implications for insurance and risk transfer. **Journal of Environmental Management**, v.81, n.4, p.351-359, Dec.2006.

TUCCI, E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2002. 943p. ISBN 85-7025-663-9

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **National engineering handbook**: Section 4, Hydrology. Washington: Soil Conservation Service, 1972.

WHITE, I.; HOWE, J. Flooding and the role of planning in England and Wales: a critical review. **Journal of Environmental Planning and Management**, v.45, n.5, p.735-745, Sep. 2002.

WOODWARD, D.E.; HAWKINS, R.H.; JIANG, R.; HJELMFELT, A.T.; VAN MULLEM, J.A.; QUAN, Q.D. Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio. In: World Water and Environmental Resources Congress, 2003, Philadelphia. **Proceedings...** American Society of Civil Engineers (ASCE) Publications, 2003. (doi 10.1061/40685(2003)308)

APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE

```
-- IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO DE CURVA NÚMERO DO SCS
-- DINÂMICO DISTRIBUÍDO

csBacia = CellularSpace { dbType = "ADO",
                          host = "localhost",
                          database = D:\\Mestrado_INPE\\TD
                                      \\Banco_TerraView314\\Petropolis.mdb",
                          user = "",
                          password = "",
                          layer = "CelulasOK",
                          theme = "CelulasOK",
                          select = {"object_id", "Lin", "Col",
                                     "DECLIV", "LDD", "ACUM", "VIS"},
                          }

----<|||>----<|||>----<|||>----<|||>----<|||>----<|||>
-- < DESCRIÇÃO DOS ATRIBUTOS DO ESPAÇO CELULAR >
-----

-- cell.Col = Índice de Coluna (inicia-se com 0)
-- cell.Lin = Índice de Linha (inicia-se com 0)
-- cell.DECLIV = Declividade dada em porcentagem
-- cell.LDD = Codificação do sentido do fluxo de escoamento
-- cell.ACUM = Número de células à montante que drenam para cell
                (inclusive)
-- cell.VIS = Classe de uso e cobertura do solo
-- cell.Qp = Vazão de pico em m3/s
-- cell.Qdia = Volume de água, em m3, escoado em um dia
-- cell.QR_past = Volume de água, em m3, restante do tempo anterior
-----

----<|||>----<|||>----<|||>----<|||>----<|||>----<|||>
-- < CODIFICAÇÃO DAS CLASSES V-I-S >-----
  AREA_URBANA = 1
  CAMPO_RUPESTRE = 2
  FLORESTA = 3
  VEG_SECUND = 4
  SOLO_EXP = 5

-- < VALORES DE CURVA NÚMERO PARA CADA CLASSE >-----
  CN2_AreaUrb = 97.38283329
  CN2_CampRup = 74.38871992
  CN2_Floresta = 69.92488632
  CN2_VegSecund = 76.87715982
  CN2_SoloExp = 83.97503009

----< PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO >-----
INI_TIME = 1 -- Posição inicial no vetor CHUVA para rodar o modelo
FINAL_TIME = 20 -- Posição final do vetor CHUVA, onde o modelo pára
AMC_INI = 1 -- Condição AMC para os 5 primeiros valores de CHUVA
```

```

CHUVA = { 1.00, -- 1 <<< Vetor de chuvas >>>
          2.50, -- 2
          0.25, -- 3
          0.00, -- 4
          45.25, -- 5
          17.00, -- 6
          28.25, -- 7
          3.50, -- 8
          0.00, -- 9
          0.00, -- 10
          0.00, -- 11
          37.25, -- 12
          17.50, -- 13
          3.00, -- 14
          15.75, -- 15
          19.50, -- 16
          0.25, -- 17
          0.00, -- 18
          0.00, -- 19
          0.00 } -- 20

Dt = 24 -- Variação de tempo dos valores de chuva em horas.
        -- 1 dia <=> Dt = 24 horas
Res = 30 -- Espaçamento da grade do Espaço Celular
Ia_S = 0.05 -- Razão entre a absorção inicial e o fator de retenção
LIMITE_AMC_INF = 20.28 -- Valor abaixo do qual se considera a
--                       condição AMC I
LIMITE_AMC_SUP = 52.94 -- Valor acima do qual se considera a
--                       condição AMC III
-----
csBacia:load()

-- ORDEM DE VARREDURA DA GRADE, DE ACORDO COM O VALOR DA GRADE
-- ACUMULADA
itGA = SpatialIterator{
    csBacia,
    function( cell ) return true end,
    function( c1, c2 ) return c1.ACUM < c2.ACUM end
    }

-- Criação da Função de Vizinhaça LDD
function CreateLddNeighbourhood( cs )

    COL = {0,1,1,0,-1,-1,-1,0,1}
    LIN = {0,0,-1,-1,-1,0,1,1,1}

    for i, cell in ipairs( cs.cells ) do
        if(cell.LDD ~= nil) then
            local neigh = Neighbourhood()
            index = TeCoord{ x = (cell.x + COL[cell.LDD+1]), y =
(cell.y + LIN[cell.LDD+1]) }
            neigh:addCell( index, cs, 1/9 )
            cell:addNeighbourhood( neigh )
        end -- if
    end -- for
end

```

```

-- Função para a chamada da vizinhança LDD
function ForLddNeighbour( cell, ind, f )

    local neighbourhood = cell:getNeighbourhood(ind)
    if( neighbourhood == nil) then return false end
    neighbourhood:first()
    neigh = neighbourhood:getNeighbour()
    if(neigh == nil) then return false end
    f( cell, neigh )
    return true
end

--<< ACÚMULO DE CN E DECLIVIDADE >>--->>--->>--->>--->>--->>
function AcumCN_AcumDECL (Cell, Neigh)

    if(Cell.DECLIV == 0.0) then Cell.DECLIV = 2.0 end
    Neigh.CN[2] = Neigh.CN[2] + Cell.CN[2]
    Neigh.DECLIV = Neigh.DECLIV + Cell.DECLIV
    return true
end

--<< CÁLCULO DO CN MÉDIO E CORREÇÃO PELA DECLIVIDADE --->>--->>
function Correcao_CNs (Cell)

    Cell.CN[2] = Cell.CN[2] / Cell.ACUM
    Cell.DECLIV = Cell.DECLIV / Cell.ACUM

    Cell.CN[3] = Cell.CN[2]*math.exp( 0.00673*(100 - Cell.CN[2]) )

    Cell.CN[2] = (1/3)*(Cell.CN[3] - Cell.CN[2])*
        (1 - 2*math.exp(-13.86*Cell.DECLIV/100)) +
        Cell.CN[2]
    Cell.CN[1] = Cell.CN[2] - ( (20*(100 - Cell.CN[2]) ) / ( 100 -
        Cell.CN[2] + math.exp(2.533 - 0.0636*(100 - Cell.CN[2])) ) )
    Cell.CN[3] = Cell.CN[2] * math.exp(0.00673*(100 - Cell.CN[2]))

    return true
end

--<< DETERMINAÇÃO DA CONDIÇÃO DE UMIDADE ANTECEDENTE (AMC) --->>
function AMC (t)

    if(t <= 5) then
        return (AMC_INI)
    else
        soma_chuva5 = 0          -- Chuva acumulada nos últimos 5 dias
        for i = (t-5), (t-1), 1 do
            soma_chuva5 = soma_chuva5 + CHUVA[i]
        end
        if(soma_chuva5 < LIMITE_AMC_INF) then
            return (1)
        elseif(soma_chuva5 > LIMITE_AMC_SUP) then
            return (3)
        else return (2) end
    end

```

```

--<< CÁLCULO DA CHUVA EFETIVA --->>--->>--->>--->>--->>--->>--->>
function Calculo_Q (Cell, amc, tempo)

Area = Cell.ACUM*(Res^2) -- Área de contribuição da célula em m²
S = 254*( (100/Cell.CN[amc]) - 1 ) -- Fator de retenção

if( CHUVA[tempo] > (Ia_S*S) ) then

    Qmm = ((CHUVA[tempo]-Ia_S*S)^2 )/( CHUVA[tempo] + (1-Ia_S)*S )
    tL = ( 1.347*math.pow(Cell.Lf , 0.8)*math.pow((S/10) + 2.54 ,
        0.7))/(1900*math.pow(Cell.DECLIV, 0.5))

    tp = tL + Dt/2
    Tb = 2.67094*tp
    Cell.Qp = (0.208073241781107*Area*Qmm)/(tp*1000000)
    if(Tb > Dt)then
        QR_mcub = (Cell.Qp * ((Tb - Dt)*3600)^2 )/(2*(Tb - tp)*3600)
    else QR_mcub = 0 end
    Qmcub = ( Qmm*Area )/1000
    Cell.Qdia = Cell.QR_past + (Qmcub - QR_mcub)
    QR_mm = QR_mcub*1000/Area
    Qdia_mm = Cell.Qdia*1000/Area

    Cell.QR_past = QR_mcub

else
    Cell.Qp = 0
    Cell.Qdia = Cell.QR_past
    Cell.QR_past = 0

end -- if else CHUVA

if(Cell:getNeighbourhood(0) == nil) then

    print(" ")
    print("<<<<TEMPO>>>> ["..tempo.."] --> AMC: "..amc.." <--")
    print("DECLIV = "..Cell.DECLIV)
    print("Lf = "..Cell.Lf)
    print("CN = "..Cell.CN[amc])
    print("S = "..S)
    print("Qmm = "..Qmm)
    print("Tb = "..Tb)
    print("Cell.Qp = "..Cell.Qp)
    print("Cell.Qdia = "..Cell.Qdia)
    print("Cell.QR_past = "..Cell.QR_past)
    print(" ")
end

return true
end -- Calculo_Q

```



```

-- ATRIBUIÇÃO DE VALORES INICIAIS AOS ATRIBUTOS

ForEachCell(csBacia,
  function(cell)

    cell.Lf = 0
    cell.QR_past = 0
    cell.CN = {}

    --<< Atribuição dos Valores de Curva Número >>--
    if(cell.VIS == AREA_URBANA) then
      cell.CN[2] = CN2_AreaUrb

    elseif(cell.VIS == CAMPO_RUPESTRE) then
      cell.CN[2] = CN2_CampRup

    elseif(cell.VIS == FLORESTA) then
      cell.CN[2] = CN2_Floresta

    elseif(cell.VIS == VEG_SECUND) then
      cell.CN[2] = CN2_VegSecund

    elseif(cell.VIS == SOLO_EXP) then
      cell.CN[2] = CN2_SoloExp

    else cell.CN[2] = 84.1942
    end

    return true
  end )--ForEachCell

CreateLddNeighbourhood(csBacia)

Percorrimento_1(time)

for time = INI_TIME, FINAL_TIME, 1 do
  Percorrimento_2(time)
  csBacia:save(time, "Vazão_", {"Qdia", "Qp"})
end -- for time

```

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.