

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO HIDROLÓGICO DE  
TRANSFORMAÇÃO CHUVA-VAZÃO E PROPAGAÇÃO DE VAZÃO  
EM RESERVATÓRIOS**

Raíza Cristóvão Schuster

Orientador: Walter Collischonn

Co-orientador: Fernando Dornelles

Porto Alegre, dezembro de 2014.

RAÍZA CRISTÓVÃO SCHUSTER

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO HIDROLÓGICO DE  
TRANSFORMAÇÃO CHUVA-VAZÃO E PROPAGAÇÃO DE VAZÃO EM  
RESERVATÓRIOS**

O presente documento apresenta o de  
Engenharia Ambiental da Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, sendo um dos requisitos para  
obtenção do Título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Walter Collischonn

Co-orientador: Fernando Dornelles

Porto Alegre, dezembro de 2014.

## **RESUMO**

Estudos hidrológicos que possibilitem o entendimento da dinâmica das inundações são de grande importância para que existam avanços na prevenção e no controle dos impactos causados por este fenômeno. Estes estudos baseiam-se na estimativa das vazões máximas que são atingidas em pontos críticos de uma bacia hidrográfica, para então serem dimensionados dispositivos que minimizem seus efeitos. Bacias hidrográficas pequenas raramente possuem dados observados de vazão, sendo então necessários métodos simplificados para sua estimativa. Este trabalho apresenta um modelo hidrológico simplificado acoplado a um software de SIG para aplicação em estudos hidrológicos, possibilitando a determinação de vazões de projeto para bacias hidrográficas sem dados e o posicionamento e dimensionamento de reservatórios de amortecimento de cheias.

Palavras chave: modelo hidrológico; chuva-vazão; reservatório.

## SUMÁRIO

1	Introdução e Objetivo .....	1
2	Revisão Bibliográfica .....	2
2.1	Modelagem hidrológica.....	2
2.1.1	Classificação.....	2
2.1.2	Histórico .....	3
2.1.3	Utilização.....	4
2.2	Modelos de Transformação Precipitação-Vazão.....	5
2.2.1	Modelagem contínua .....	5
2.2.2	Modelagem por evento .....	6
2.3	Modelos de Propagação de Escoamento .....	8
2.3.1	Canais .....	9
2.3.2	Reservatórios .....	10
2.4	Linguagens de Programação e Interfaces.....	10
2.5	Integração de modelos hidrológicos com Sistemas de Informação Geográfica	11
3	O Modelo proposto.....	14
3.1	Módulo de transformação Chuva-Vazão.....	15
3.1.1	Dados de entrada .....	17
3.1.2	Processamento dos dados: Método SCS .....	23
3.1.3	Dados de saída.....	26
3.2	Módulo de propagação de vazão em reservatórios .....	26
3.2.1	Dados de entrada .....	28
3.2.2	Processamento dos dados: Método de Puls.....	28
3.2.3	Dados de saída.....	32
4	Exemplos de aplicação metodológica.....	33
4.1	Módulo de transformação chuva-vazão .....	33

4.2	Módulo de propagação de vazão em reservatórios .....	38
5	Discussões .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
6	Referências .....	44
7	Anexos.....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. <i>Plug-in</i> do modelo desenvolvido habilitado no MapWindow GIS.....	14
Figura 3.2. Janela do módulo de transformação Chuva-Vazão.....	15
Figura 3.3. Estrutura do módulo de transformação chuva-vazão.....	16
Figura 3.4. Seleção do <i>shapefile</i> do contorno da bacia hidrográfica no <i>plug-in</i> .....	17
Figura 3.5. Hidrograma unitário triangular do SCS .....	25
Figura 3.6. Janela do módulo de vazão em Reservatório.....	26
Figura 3.7. Estrutura do módulo de propagação de vazão em reservatórios.....	27
Figura 3.8. Termos da equação da continuidade .....	29
Figura 3.9. Vertedor livre .....	31
Figura 3.10. Descarregador de fundo .....	31
Figura 4.1. Contorno da bacia hidrográfica.....	34
Figura 4.2. Mapa de solos para a área da bacia. ....	35
Figura 4.3. Mapa de cobertura vegetal para a área da bacia.....	36
Figura 4.4. Hidrogramas gerados no módulo chuva-vazão no modelo proposto e no IPHS1. ....	38
Figura 4.5. Hidrograma de entrada no módulo de propagação de vazão em reservatório .....	39
Figura 4.6. Hidrograma de saída do modelo proposto. ....	40
Figura 4.7. Hidrograma de saída do exemplo do livro. <b>Erro! Indicador não definido.</b>	

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Equações de Tempo de Concentração inseridas no modelo.....	19
Tabela 3.2. Parâmetros da Equação IDF para diversas cidades do Brasil.....	21
Tabela 4.1. Combinações de tipos de solo e cobertura na bacia. ....	36
Tabela 4.2. Tabela Cota x Volume do reservatório.....	39

## LISTA DE SIGLAS

BASIC	Beginners All-purpose Symbolic Instruction Code
FORTRAN	Formula Translation
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
MDE	Modelos Digitais de Elevação
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SR	Sensoriamento Remoto

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área da bacia hidrográfica
$a, b, c, d$	Parâmetros característicos da IDF
$A_o$	Área do orifício
$C$	Coefficiente de descarga do vertedor
$C'$	Coefficiente de descarga do descarregador de fundo
$CN$	<i>Curve Number</i> ou número de escoamento da bacia hidrográfica
$D$	Duração da chuva efetiva unitária
$g$	Aceleração da gravidade
$h$	Diferença da cota do nível da água no reservatório e da cota da soleira do vertedor
$h'$	Altura da água desde a superfície até o centro do orifício
$I$	Intensidade da chuva
$I_t e I_{t+1}$	Vazões de entrada no reservatório em $t$ e $t+1$
$I_a$	Perdas iniciais
$L$	Largura do vertedor
$L_1$	Comprimento do curso d'água principal
$L_2$	Comprimento do talvegue desde o divisor de águas
$L_3$	Comprimento do coletor pluvial ou canal principal
$n$	Rugosidade de Manning
$P$	Precipitação total acumulada
$Q_t e Q_{t+1}$	Vazões de saída do reservatório em $t$ e $t+1$
$S$	Capacidade máxima de armazenamento da camada superior do solo
$S_t e S_{t+1}$	Armazenamento do reservatório em $t$ e $t+1$
$S_1$	Declividade média do rio principal
$S_2$	Declividade média do talvegue
$S_3$	Declividade média do coletor pluvial ou canal principal
$t_b$	Tempo desde o início do evento chuvoso até o final do escoamento superficial no exutório da bacia
$T_c$	Tempo de Concentração da bacia hidrográfica
$t_d$	Duração da chuva de projeto
$t_p$	Tempo de pico
$T_p$	Tempo desde o início do evento chuvoso até o pico do hidrograma unitário
$TR$	Tempo de Retorno
$V$	Volume superficial acumulado

## **1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO**

A expansão das áreas urbanas é um fator que provoca significativas alterações no ciclo hidrológico, principalmente através de mudanças na cobertura do terreno, que modificam a permeabilidade do solo, a velocidade com que a água escoar sobre ele e a geração de sedimentos. Estas alterações são as principais causas de inundações urbanas, que são problemas comuns há diversas décadas em todo o mundo.

Inundações urbanas podem causar mortes e gerar grandes prejuízos financeiros para os governantes, que precisam agir emergencialmente para apoiar a reconstrução das estruturas devastadas pela força da água. Além destes impactos, inundações podem causar diversos outros, como congestionamento no trânsito, interrupção de atividades econômicas nas áreas inundadas, diminuição da qualidade das águas e disseminação de doenças de veiculação hídrica.

Nesse contexto, tornam-se importantes estudos que possibilitem o entendimento da dinâmica das inundações e que permitam avanços na prevenção e no controle dos impactos causados por este fenômeno. Estes estudos baseiam-se na estimativa das vazões máximas que são atingidas em uma bacia hidrográfica, para então serem dimensionados dispositivos que minimizem seus efeitos.

Bacias hidrográficas pequenas, como as existentes em áreas urbanas, raramente possuem dados observados de vazão, sendo então necessários métodos simplificados para sua estimativa, que representem a interação entre a precipitação e a bacia, que tem como resultado a vazão em um rio.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo hidrológico simplificado acoplado a um software de SIG (Sistema de Informações Geográficas) para aplicação em estudos hidrológicos, possibilitando a determinação de vazões de projeto para bacias hidrográficas sem dados e o posicionamento e dimensionamento de reservatórios de amortecimento de cheias.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Modelagem hidrológica**

Um modelo hidrológico é uma representação matemática de um sistema hídrico (FAN & COLLISCHONN, 2013). Segundo TUCCI (2005), sistemas são compostos por fenômenos, variáveis e parâmetros.

Um fenômeno é um processo físico que produz alteração de estado num sistema. Em sistemas hídricos, os fenômenos envolvidos são precipitação, evaporação, infiltração e escoamento da água. Variáveis são valores que descrevem quantitativamente um fenômeno, variando no espaço e no tempo. Por exemplo, a vazão é uma variável que descreve o estado do escoamento, uma série histórica de chuvas descreve a variação da precipitação no tempo. Parâmetros são valores que caracterizam o sistema e também podem variar no tempo e no espaço. Alguns dos parâmetros de modelos hidrológicos são: a área e perímetro de uma bacia hidrográfica, a declividade e comprimento de um trecho de rio, capacidade de infiltração do solo, temperatura do ar e da água, entre outros (TUCCI, 2005).

#### **2.1.1 Classificação**

Os modelos hidrológicos podem ser classificados conforme diversos critérios, como a distribuição no tempo, a representação da variabilidade espacial, a consideração dos processos físicos e da probabilidade de ocorrência dos eventos. É importante conhecer a classificação dos modelos, para que sejam explicitadas as limitações e habilidades de cada modelo. A seguir, são apresentadas algumas formas de classificação de modelos hidrológicos.

Um sistema contínuo é aquele em que os fenômenos que nele ocorrem são contínuos no tempo; um sistema é dito discreto quando a representação das mudanças de estado que nele ocorrem é dada em intervalos de tempo discretos. Mesmo que um sistema seja contínuo, seus registros serão mensurados em intervalo de tempo discretos, e o modelo correspondente irá representá-lo também em intervalos de tempo discretos. Quanto menor o intervalo de tempo de discretização, maior será a aproximação do modelo com um sistema contínuo. Existe também a classificação em contínuo e por

evento. Os modelos de evento simulam um evento individual, dadas as condições iniciais, enquanto que os modelos contínuos simulam longos períodos de tempo.

Modelos concentrados não consideram a variação espacial dos fenômenos, variáveis e parâmetros, atribuindo um valor médio dos fatores para toda a bacia. Já os modelos distribuídos consideram a variação destes fatores do espaço, discretizando a bacia em pequenas subdivisões. Essas subdivisões podem ser sub-bacias, minibacias ou módulos quadrados.

Em um modelo do tipo determinístico, para um conjunto conhecido de dados de entrada, o modelo sempre responde com o mesmo conjunto de resultados de saída. Já um modelo dito estocástico tem em sua formulação o conceito de probabilidade de ocorrência das variáveis, produzindo saídas aleatórias para as mesmas entradas.

Modelos conceituais levam em consideração os aspectos conceituais dos processos físicos envolvidos no processo representado. Os modelos empíricos, também conhecidos como “caixa-preta” ajustam os valores calculados aos valores observados através de equações que não tem relação com os processos físicos envolvidos, mas que se ajustam ao comportamento observado. Estes modelos importam técnicas matemáticas e estatísticas visando a melhor representação da saída com base na entrada. As dificuldades encontradas no uso deste tipo de modelo são o empirismo dos parâmetros e as incertezas para simulações fora da faixa em que o modelo foi ajustado.

Os modelos são classificados com uma combinação das classificações descritas anteriormente. O modelo hidrológico proposto neste trabalho é classificado como discreto, de evento, concentrado, determinístico e conceitual.

### **2.1.2 Histórico**

Os primeiros modelos hidrológicos foram desenvolvidos na década de 30 e buscavam descrever individualmente os componentes dos processos envolvidos no ciclo hidrológico. Alguns exemplos são a equação de Horton para o cálculo da infiltração pontual, o modelo Muskingun para o escoamento em rios e o modelo de Puls para o escoamento em reservatórios (HORTON, 1939; McCARTHY, 1939; PULS, 1928).

Até a década de 50, os métodos utilizados na Hidrologia se limitavam a obter a solução de um problema específico, ou produzir indicadores estatísticos dos processos que envolviam os dados coletados diariamente. Com a disponibilidade dos

computadores e com o aprimoramento e experimentação de técnicas numéricas e estatísticas, houve desenvolvimento acelerado de modelos hidrológicos semiconceituais de transformação chuva-vazão, que reuniam diversos processos do ciclo hidrológico.

Modelos de transformação chuva-vazão representam a porção do ciclo hidrológico entre a precipitação que sobre uma bacia hidrográfica e a vazão que escoar em um rio. Estes modelos surgiram com a necessidade de se gerar séries de vazões a partir de dados de precipitação, que são mais facilmente obtidos. Os mais conhecidos dos primeiros modelos hidrológicos desenvolvidos foram o SSARR, criado em 1958 e o STANFORD IV, desenvolvido em 1966 (TUCCI, 2005).

Em paralelo aos modelos semiconceituais, foram desenvolvidos os modelos empíricos, como o método coaxial, desenvolvido em 1949, e o ajuste do hidrograma unitário pelos métodos dos mínimos quadrados, série de Fourier, transformadas de Laplace, polinômios de Laguerre e uso de séries temporais (TUCCI, 2005).

Nas últimas décadas, surgiram duas tendências de desenvolvimento de modelos hidrológicos: os modelos para grandes bacias e os modelos para pequenas bacias. Os modelos para grandes bacias tratam de forma empírica a distribuição dos parâmetros em grandes áreas, já os modelos para pequenas bacias buscam representar os processos hidrológicos com maior exatidão e de forma distribuída (TUCCI, 2005).

Atualmente, os modelos distribuídos agregados a modelos digitais de elevação e ao geoprocessamento têm buscado melhorar a representatividade do comportamento das diferentes partes da bacia, sujeitas e diferentes ações antrópicas, através da representação espacial e temporal das variáveis de entrada e de atributos físicos da bacia (TUCCI, 2005).

### **2.1.3 Utilização**

Modelos hidrológicos podem ser utilizados em aplicações nas diferentes fases do gerenciamento dos recursos hídricos e para projetos em diversas áreas do desenvolvimento de uma sociedade, como a expansão urbana, o transporte, energia, produção agrícola e controle de impactos. Diversos tipos de projetos que envolvem recursos hídricos podem se apoiar em modelos hidrológicos para as fases de planejamento, concepção e controle.

Abastecimento de água no meio urbano, tratamento de esgotos, projetos e operação de hidrelétricas, navegação, irrigação, impactos de obras hidráulicas, impactos de despejo de efluentes, controle de cheias e estiagens, segurança de barragens, concessão de uso da água e cadastro de usuários são aspectos de recursos hídricos que se utilizam de modelos hidrológicos para simulações. (TUCCI, 2005)

Modelos hidrológicos de transformação precipitação-vazão apresentam diversas aplicações como: previsão de cheias, definição de cheias de projeto, operação de hidrelétricas, estimativa da vazão para navegação, entre outros. Modelos de escoamento em cursos d'água podem simular a qualidade da água nos rios, estimativa do calado e operação de barragens e determinação de áreas de várzea e de remanso em canais. Modelos de balanço de reservatório podem ser utilizados para regularização de vazões, amortecimento de cheias e operação de hidrelétricas. Modelos estatísticos podem ser utilizados para preenchimento de falhas em séries de dados e determinação de vazões máximas e mínimas. ( TUCCI, 2005)

## ***2.2 Modelos de Transformação Precipitação-Vazão***

Os modelos de transformação precipitação-vazão, ou simplesmente modelos chuva-vazão, podem descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, depressões do solo, o fluxo através do solo pela infiltração e percolação, o escoamento subsuperficial e superficial laminar e nos cursos d'água. Os aspectos mais importantes para a escolha do modelo hidrológico a ser utilizado são os objetivos da utilização, as limitações do modelo na representação dos processos e a qualidade e quantidade das informações utilizadas em conjunto com o modelo. Estes modelos possuem dois tipos de modelagem: contínua ou por evento.

### **2.2.1 Modelagem contínua**

Os modelos contínuos de transformação chuva-vazão são capazes de realizar estimativas de vazões baseadas em dados de séries históricas de precipitação. Alguns exemplos deste tipo de modelo são o IPH2, o TopModel e o MGB-IPH.

O TopModel foi proposto em 1979 como um modelo simplificado, baseado em parâmetros físicos que podem ser medidos diretamente em uma bacia hidrográfica,

visando englobar os efeitos distribuídos de áreas de contribuição variáveis e da rota do fluxo sobre a rede de drenagem (BEVEN e KIRKBY, 1979).

O modelo IPH II simula o comportamento de uma bacia através de algoritmos simples e com um mínimo de parâmetros. O modelo considera os principais fenômenos do processo precipitação-vazão: as perdas por evaporação e interceptação (vegetal e depressões), a separação do escoamento (infiltração) e a propagação dos escoamentos superficial e subterrâneos; e permite a otimização dos parâmetros. A aplicabilidade do modelo foi verificada nas bacias dos rios Ray (Inglaterra), Capivari e Arroio Dilúvio (Porto Alegre), duas bacias rurais e uma urbana, respectivamente. (TUCCI, 1981)

A última versão do IPH II (TUCCI, 1993) permite simular a distribuição espacial da ocupação urbana e da variação do tempo de contribuição de diferentes subtrechos de uma bacia urbana. A nova versão leva em conta a variabilidade espacial dos parâmetros, enquanto a anterior considerava parâmetros médios, permitindo simular a distribuição não uniforme dos fatores nas bacias hidrográficas.

O MGB-IPH foi desenvolvido por COLLISCHONN (2001), para representar o comportamento hidrológico de grandes bacias hidrográficas, considerando a distribuição espacial das características físicas mais importantes no processo de transformação de chuva em vazão, no consumo de água por evapotranspiração e no transporte da água através da rede de drenagem.

### **2.2.2 Modelagem por evento**

Os modelos chuva-vazão de evento têm o objetivo de estimar o deflúvio gerado por um determinado evento de chuva que cai sobre uma bacia. Estes modelos são de fácil uso e fornecem resultados satisfatórios quando utilizados com discernimento. Este tipo de modelo é bastante utilizado em atividades de projeto, que exigem uma abordagem mais objetiva, pois são muito menos complexos e necessitam de menos dados de entrada, quando comparados aos modelos contínuos.

Nestes modelos, o tempo de retorno da vazão máxima gerada por uma chuva de projeto é, por hipótese, considerado igual ao período de retorno da chuva de projeto utilizada (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). Outra hipótese deste tipo de modelo é que a evapotranspiração que ocorre durante o evento de chuva é zero, isto por que, durante o evento, a umidade do ar se aproxima de 100%, o que tornaria a parcela

do volume precipitado que retorna à atmosfera por evapotranspiração desprezível frente às demais variáveis. Os exemplos mais conhecidos e utilizados deste tipo de modelo são o Método Racional e o Método SCS.

O Método Racional foi apresentado pela primeira vez em 1851 por Mulvaney e usado nos Estados Unidos por Emil Kuichling em 1889 e estabelece uma relação entre a chuva e o escoamento superficial (TOMAZ, 2013). O nome do método é para contrapor os métodos anteriores que eram empíricos e não racionais.

Este método permite estimar a vazão de pico em função do tempo de concentração e do coeficiente de escoamento da bacia, que é um parâmetro que descreve as características da bacia.

O Método SCS é um modelo precipitação-vazão apresentado pelo *Soil Conservation Service* (SCS, 1975 *apud* TUCCI, 2005, pg 284). Este modelo tem sido muito utilizado em todo o mundo devido ao reduzido número de parâmetros exigidos para o cálculo e pela relação entre os parâmetros necessários e características físicas da bacia. Este modelo é do tipo concentrado, mas, se combinado com um modelo de escoamento em rios e canais, pode fazer parte de um modelo distribuído. O modelo não foi desenvolvido com o compromisso de representar um evento específico, e é utilizado para a simulação de hidrogramas de cheias de projeto de obras hidráulicas com um determinado risco.

O texto técnico que explica os procedimentos do modelo SCS, escrito pelo Departamento de Agricultura da Universidade dos Estados Unidos (USDA, 1986), dá maior ênfase para a aplicação em bacias urbanas ou em processo de urbanização, mas afirma que a metodologia pode ser aplicada quaisquer pequenas bacias, com algumas limitações consideradas.

O modelo SCS é um dos métodos de transformação de chuva em vazão utilizado no sistema computacional IPHS1, desenvolvido e pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em conjunto com a Faculdade de Engenharia Agrícola (FEA) da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) e pelo Departamento de Física do Setor de Hidráulica e Saneamento da Fundação Universidade Federal de Rio Grande (FURG) (TUCCI, 2004).

Enquanto o método SCS fornece como resultado um hidrograma de projeto, o método racional é utilizado para a determinação de apenas um ponto do hidrograma, o pico, ou seja, a vazão máxima atingida durante o escoamento superficial direto. Segundo recomendações das Diretrizes básicas para projetos de drenagem urbana no município de São Paulo (FCTH, s/d), o método racional só deve ser aplicado em pequenas bacias que não apresentam complexidade e que tenham área de drenagem inferior a 3 km<sup>2</sup>, ou quando o tempo de concentração da bacia for inferior a uma hora.

Segundo o Manual de drenagem urbana de Porto Alegre, o método racional tem sido utilizado para a estimativa das vazões na microdrenagem, como condutos pluviais ou canais em um loteamento. Já os modelos que determinam o hidrograma de escoamento, como o método SCS, são utilizados para obras de macrodrenagem, como os reservatórios.

A grande diferença entre os métodos SCS e Racional é que o Método Racional não avalia o volume da cheia e a distribuição temporal das vazões, ao contrário do método SCS. Este é o principal motivo da escolha do método SCS para a aplicação no presente trabalho. O volume da cheia é importante para o dimensionamento de reservatórios, pois este é o principal fator que influencia o volume do reservatório. A distribuição temporal das vazões que chegam ao reservatório é importante para que o volume do reservatório projetado não seja superestimado, já que todo o volume não precisa ser armazenado ao mesmo tempo.

### ***2.3 Modelos de Propagação de Escoamento***

Existem modelos hidrológicos para simular o escoamento na superfície do solo, em canais (condutos ou rios) e em reservatórios. Este tipo de escoamento é representado através de equações que retratam a conservação da massa, da energia e da quantidade de movimento. As equações da continuidade e de quantidade de movimento, de Euler, para fluidos ideais, e de Navier-Stokes, para fluidos reais representam o processo na dimensão do tempo e nas três dimensões do espaço.

Entretanto, estas equações não são práticas para representar o escoamento em sistemas naturais, pois exigem muitas informações do sistema, e apresentam formulações de difícil implementação e uso (TUCCI, 2005). Os modelos de escoamento

utilizam as equações acima citadas, introduzindo simplificações que permitem a determinação de soluções numéricas.

### 2.3.1 Canais

O escoamento superficial em rios e canais pode ser retratado pelas equações unidimensionais do escoamento não-permanente gradualmente variado, conhecidas como equações de Saint-Venant. Estas equações representam os efeitos da inércia, da força de pressão, da gravidade e do atrito (TUCCI, 2005).

Somente nas últimas décadas, através de métodos numéricos e computadores digitais foi possível determinar soluções analíticas para as equações de Saint-Venant. Para a maior parte das aplicações, são feitas simplificações destas equações (TUCCI, 2005).

Em rios com grande declividade, as forças de gravidade e de atrito são preponderantes. Nestes casos, os termos de pressão e de inércia das equações de Saint Vénant podem ser desprezados, pois são insignificantes quando comparados com os outros dois termos. Os modelos que utilizam as equações desta forma são ditos modelos onda cinemática (TUCCI, 2005).

Para a representação do escoamento em rios e canais que sofrem efeito de jusante em seu escoamento de montante, que ocorre em rios e canais próximos a oceanos, lados, estuários e nos pequenos afluentes de rios maiores, o termo de pressão das equações não pode ser desconsiderado. As equações são então utilizadas desprezando-se apenas os termos de inércia, e os modelos são ditos de difusão (TUCCI, 2005).

O termo de inércia só não pode ser desprezado quando ocorre grande variação temporal e espacial da velocidade do escoamento. Para estes casos, é importante a utilização modelos que considerem a equação da quantidade de movimento completa, que são os modelos hidrodinâmicos. Este tipo de modelo requer maior quantidade de dados, mas tem a vantagem de possuir maior exatidão e representação física do escoamento (TUCCI, 2005).

Existe ainda um quarto tipo de modelo de escoamento, são os chamados modelos de armazenamento. Estes modelos utilizam a equação da continuidade concentrada e uma relação entre o armazenamento e as vazões de entrada e saída do

trecho para simular o escoamento em rios ou canais. Este tipo de modelo tem sido muito utilizado em hidrologia devido principalmente à simplicidade de formulação e ao pequeno volume de dados usados. Alguns exemplos destes modelos são o Muskingum, o reservatório linear simples e o SSARR. Este tipo de modelo pode ser utilizado quando o efeito preponderante é o amortecimento devido ao armazenamento e não existem efeitos de jusante sobre o escoamento (TUCCI, 2005).

### **2.3.2 Reservatórios**

Em reservatórios relativamente curtos, a linha de água é aproximadamente horizontal e o escoamento é caracterizado por uma baixa velocidade e grande profundidade. Estas características tornam os termos dinâmicos do escoamento desprezíveis perto da grande variação do armazenamento. Para estes casos, são utilizados modelos do tipo Armazenamento para descrever o comportamento do escoamento (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Um dos métodos mais conhecidos para a simulação do escoamento em reservatórios é o método de Puls. Este método utiliza a equação de continuidade concentrada. Outro modelo para propagação de cheias em reservatórios é o Método preditor-corretor, ou Método de Heun. Em reservatórios longos e rasos, as hipóteses descritas no início desta sessão não são válidas (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). Neste caso, o reservatório deve ser considerado como um rio, e as equações de propagação de escoamento em canais devem ser utilizadas.

## **2.4 Linguagens de Programação e Interfaces**

Uma linguagem de programação funciona como um tradutor entre o usuário e a linguagem do computador, permitindo que o usuário estabeleça o que a máquina deva fazer. Existem diferentes níveis de linguagens de programação de alto nível que permitem o desenvolvimento de modelos hidrológicos, as mais conhecidas e utilizadas atualmente são Fortran, C++ e BASIC.

A linguagem FORTRAN (que foi originalmente derivada da expressão *Formula Translation*) foi desenvolvida em 1957 pelo grupo de John Backus, para aplicações numérico-científicas. Até então não existia uma forma eficiente de

programar. Após diversas modificações e novas versões, esta linguagem tornou-se amplamente utilizada, e ainda é atualmente (GABRIELLI & MARTINI, 2010).

Na década de 70, surgiu a linguagem C, projetada por Dennis Ritchie e Ken Thompson. Em 1986 surgiu uma versão aperfeiçoada da linguagem C, a chamada linguagem C++, definida por Bjarne Stroustrup (GABRIELLI & MARTINI, 2010). A linguagem C++ permite programação orientada a objeto, que permite que problemas complexos possam ser resolvidos utilizando uma abordagem mais parecida com a maneira que humanos tendem a pensar (STAUGAARD Jr., 2002).

A linguagem BASIC (que deriva da expressão *Beginners All-purpose Symbolic Instruction Code*) foi desenvolvida por Jonh Kemeny e Thomas Kurtz em 1964, com o objetivo de introduzir linguagens de programação mais facilmente a seus alunos, sem que fossem necessários muitos conhecimentos matemáticos ou sobre computadores (APPLEBY, 1991).

A Microsoft aprimorou e adicionou recursos ao BASIC, criando várias versões com nomes como MSBasic, GWBasic, BasicA, QuickBasic, QBasic e Visual Basic. Enquanto todas as demais versões são baseadas em texto, o Visual Basic é gráfico, sendo mais adequado aos ambientes de janelas. O Visual Basic tornou-se uma das linguagens mais populares (PERRY, 1999).

Para o desenvolvimento do modelo hidrológico deste trabalho, foi utilizado o software gratuito Visual Basic 2010 Express, que permite criar aplicativos Windows em linguagem BASIC baseados em .NET Framework. O .NET Framework é uma tecnologia que dá suporte à compilação de aplicativos e sua execução.

## ***2.5 Integração de modelos hidrológicos com Sistemas de Informação Geográfica***

A grande variabilidade das características naturais e da ação antrópica resulta numa grande quantidade de informações a serem transferidas para os modelos hidrológicos, onde são estabelecidas relações entre características físicas dos componentes da bacia hidrográfica e os parâmetros do modelo (TUCCI, 2005).

Neste aspecto, o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Sensoriamento Remoto (SR) tem feito parte da estrutura de entrada de alguns modelos.

Através das ferramentas de SIG e SR é possível obter camadas de informações com atributos físicos da bacia, permitindo a estimativa das características físicas das unidades de discretização da bacia (sub-bacias ou módulos), buscando a melhora da representatividade espacial e temporal do comportamento de diferentes bacias, ou das diferentes partes da bacia, sujeitas a diferentes ações antrópicas (TUCCI, 2005).

É possível realizar a delimitação de bacias hidrográficas e redes de drenagem a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) e de mapas de curvas de nível, com a possibilidade da determinação de características como área, perímetro, comprimento de rios, declividade média da bacia, declividade de rios, amplitude altimétrica, perfil longitudinal de rios, densidade de drenagem, ordenamento dos cursos d'água, entre outros.

Através da cubagem da topografia do lago formado por um reservatório, também a partir de MDEs e mapas de curvas de nível, é possível obter a relação cota x área x volume de reservatórios naturais. Técnicas de geoprocessamento também permitem a interpolação espacial de dados como precipitação e temperatura.

Em SIG, os mapas podem ser adaptados e combinados conforme a necessidade do usuário, podendo ser determinada a porcentagem de cobertura de cada classe do fator analisado sobre a bacia hidrográfica analisada, auxiliando na determinação do parâmetro CN. Imagens de sensoriamento remoto, como imagens NDVI, NDWI e imagens noturnas, podem ser utilizadas para uma estimativa mais rápida do parâmetro CN (KICH, 2014).

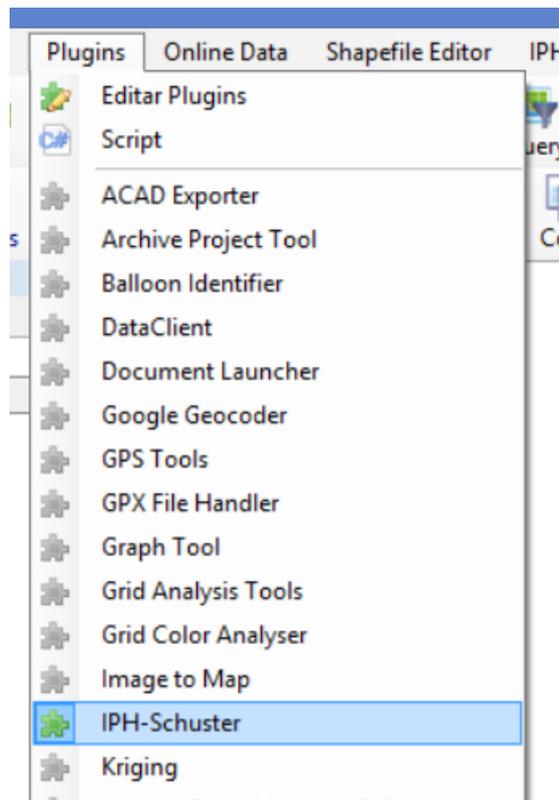
Diversos softwares de SIG possuem ferramentas de hidrologia em seu ambiente. O ArcGIS, por exemplo, possui o *Arc Hydro Tools*, que é um conjunto de ferramentas que opera dentro do programa para subsidiar análise de dados geoespaciais e temporais. O *software* MapWindow GIS possui o grupo de ferramentas TauDEM, que tem a mesma funcionalidade do *Arc Hydro Tools*. Estas ferramentas, dentre outras funções, permitem a delimitação da bacia hidrográfica e a definição da rede de drenagem dentro dela através do processamento de um Modelo Digital de Elevação (MDE).

Neste trabalho, o modelo desenvolvido foi acoplado ao MapWindow GIS, pois, além de ser um *software* livre que auxilia na obtenção de diversos parâmetros físicos

das bacias hidrográficas, ele permite que interfaces personalizadas, criadas em diferentes linguagens de programação, sejam adicionadas ao programa, através de *plug-ins*. Alguns exemplos de *plug-ins* do MapWindow GIS para aplicação em recursos hídricos são o MGB-IPH (FAN & COLLISCHONN, 2013), o SIAQUA-IPH (FAN, 2013), o SAD-IPH (KAYSER & COLLISCHONN, 2013) e o conjunto de ferramentas ainda em fase de desenvolvimento IPH *Hydro Tools*.

### 3 O MODELO PROPOSTO

O modelo hidrológico objeto deste trabalho foi desenvolvido no *software* Visual Basic 2010 da Microsoft, que utiliza linguagem de programação BASIC. O código gerado foi compilado em um aplicativo que foi adicionado ao *software* MapWindow GIS na forma de um *plug-in*, que é a interface do programa com o usuário.



**Figura 3.1. Plug-in do modelo desenvolvido habilitado no MapWindow GIS**

O modelo criado possui dois módulos principais: o módulo de transformação chuva-vazão e o módulo de balanço hídrico do reservatório. No módulo de transformação chuva-vazão, uma chuva de projeto é transformada em um hidrograma de projeto através do método SCS. Este hidrograma gerado é propagado em um reservatório, e os hidrograma de entrada e saída do reservatório podem ser comparados, verificando o amortecimento da cheia de projeto.

No módulo chuva-vazão a discretização da chuva e do hidrograma gerado é de no mínimo 5 minutos. No módulo de propagação de vazão em reservatório, o hidrograma pode ser discretizado em intervalos de 5 segundos.

### 3.1 Módulo de transformação Chuva-Vazão

Neste módulo são adicionadas informações sobre a bacia hidrográfica e uma chuva de projeto. O módulo processa as informações através do método SCS e determina um hidrograma de projeto para o evento.

A Figura 3.2 mostra a janela do módulo de transformação Chuva-Vazão, com todas as suas opções de cálculo, que serão explicadas a seguir e a Figura 3.3 e a mostra a estrutura do módulo.

Figura 3.2. Janela do módulo de transformação Chuva-Vazão

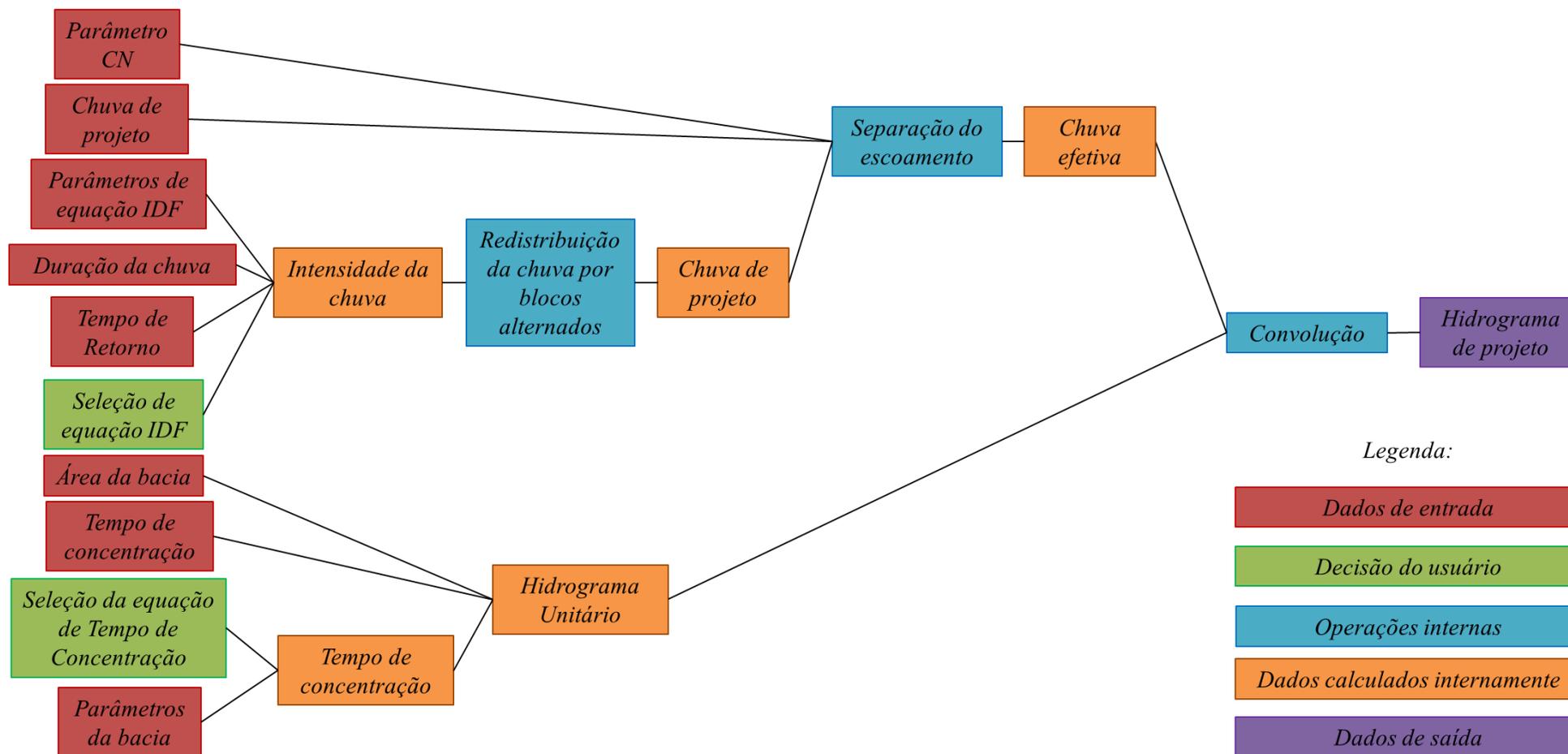


Figura 3.3. Estrutura do módulo de transformação chuva-vazão

### 3.1.1 Dados de entrada

Os dados de entrada para o módulo de transformação chuva-vazão são a área da bacia hidrográfica, o parâmetro CN, o tempo de concentração (ou informações que possibilitem o seu cálculo) e a chuva de projeto. Alguns destes dados podem ser determinadas com o auxílio do software de SIG, e informados ao programa através da tabela de atributos do *shapefile* do contorno da bacia hidrográfica ou da rede de drenagem.

#### 3.1.1.1 Área da bacia hidrográfica

A área da bacia hidrográfica é um dos parâmetros mais importantes do método SCS. Esta informação pode ser obtida através de dados secundários ou com o auxílio do MapWindow GIS ou outros *softwares* de SIG.

O valor da área pode ser digitado diretamente no local indicado ou a informação pode ser capturada diretamente do *shapefile* do contorno da bacia hidrográfica (Figura 3.4).



Figura 3.4. Seleção do *shapefile* do contorno da bacia hidrográfica no *plug-in*

A bacia hidrográfica em questão neste módulo refere-se à área de captação da água da precipitação que converge para o reservatório. Ou seja, o ponto escolhido para a localização do reservatório é o exutório da bacia.

#### 3.1.1.2 *Parâmetro CN*

O parâmetro *CN* (*Curve Number* ou número de escoamento da bacia hidrográfica) retrata as condições da camada superficial do solo, que pode variar desde uma cobertura muito permeável até uma cobertura completamente impermeável, e da camada superior de solo, que pode ter capacidade de infiltração alta ou baixa.

O *CN* é um parâmetro adimensional e seu valor varia entre 0 e 100, sendo que 0 corresponde a um solo com capacidade de infiltração infinita e 100 corresponde a um solo totalmente impermeável (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). O valor de *CN* pode ser digitado diretamente no local indicado, ou capturado através do *shapefile*.

#### 3.1.1.3 *Tempo de concentração*

Tempo de Concentração é o tempo que leva para que o escoamento chegue até um ponto de interesse, a partir do ponto hidráulicamente mais distante. No caso deste modelo, o ponto de interesse é o local onde será posicionado o reservatório.

Segundo USDA (1986), o Tempo de Concentração da bacia ( $T_c$ ) é um parâmetro crítico do modelo SCS. Este parâmetro influencia na forma e no pico do hidrograma de escoamento.

Segundo SILVEIRA (2005), o tempo de concentração é um parâmetro hidrológico difícil de ser estabelecido com critério pelos projetistas, pois há pouca informação sobre a aplicabilidade das diversas fórmulas empíricas disponíveis. Este autor avaliou o erro de 23 fórmulas de tempo de concentração, confrontando as informações disponíveis sobre a origem das fórmulas e limitações teóricas, com o desempenho obtido em aplicações a bacias urbanas e rurais com dados observados, tendo em vista fornecer indicadores para uma escolha consciente da fórmula adequada para cada caso.

A Tabela 3.1 apresenta as fórmulas de Tempo de Concentração recomendadas por SILVEIRA (2005) para bacias urbanas e bacias rurais. A ordem de preferência é indicada pelo número que antecede a letra R (bacias rurais) ou U (bacias urbanas).

Tabela 3.1. Equações de Tempo de Concentração inseridas no modelo

Fórmulas	Equação	Ordem de recomendação	Áreas para bacias rurais (km <sup>2</sup> )	Áreas para bacias urbanas (km <sup>2</sup> )
Corps of Engineers	$T_c = 0,191 L1^{0,76} S1^{-0,19}$	1R	<12.000	
Ven te Chow	$T_c = 0,160 L1^{0,64} S1^{-0,32}$	2R	6-12.000	
Onda Cinemática	$T_c = 7,35 n^{0,6} I^{-0,4} L2^{0,6} S2^{-0,3}$	3R	6-12.000	
Kirpich	$T_c = 0,0663 L2^{0,77} S2^{-0,385}$	4R, 3U	150-12.000	<27
Carter	$T_c = 0,0977 L3^{0,6} S3^{-0,3}$	1U		<11
Schaake <i>et al</i>	$T_c = 0,0828 L3^{0,24} S3^{-0,16} A_{imp}^{-0,26}$	2U		<0,7
Desbordes	$T_c = 0,0869 A^{0,3039} S3^{-0,3832} A_{imp}^{-0,4523}$	4U		<51

As equações de tempo de concentração apresentadas na Tabela 3.1 tiveram suas unidades de medidas uniformizadas para que o tempo de concentração calculado seja expresso em horas. A seguir são apresentadas as variáveis das equações:  $L1$ : comprimento do curso d'água principal (km);  $S1$ : declividade média do rio principal (m/m);  $n$ : rugosidade de Manning (adimensional);  $I$ : intensidade da chuva (mm/h);  $L2$ : comprimento do talvegue desde o divisor de águas (km);  $S2$ : declividade média do talvegue (m/m);  $L3$ : comprimento do coletor pluvial ou canal principal (km);  $S3$ : declividade média do coletor pluvial ou canal principal (m/m);  $A_{imp}$ : fração de área impermeável, variando entre 0 e 1 (adimensional).

Todas as equações de tempo de concentração da Tabela 3.1 estão disponíveis no modelo hidrológico proposto, como pode ser visto na Figura 3.2, para que o usuário escolha a equação que se aplica melhor ao caso do seu projeto. Caso o usuário deseje utilizar um valor empírico ou calculado por uma equação diferente das apresentadas anteriormente, existe a opção de o valor de Tempo de Concentração ser inserido diretamente no programa.

#### 3.1.1.4 Chuva de projeto

A chuva de projeto é um evento chuvoso idealizado, ao qual está associado um tempo de retorno, ou uma probabilidade de que esse evento venha a ser igualado ou superado em um ano qualquer (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). No modelo desenvolvido, uma chuva de projeto pode ser informada de duas formas: pelo fornecimento de uma precipitação sequencial ou através de equações IDF.

A precipitação sequencial pode ser digitada diretamente na área correspondente ou adicionada na forma de um arquivo texto em formato ASCII.

Equações IDF são obtidas a partir da análise estatística de séries longas de dados de um pluviógrafo instalado na região da bacia em estudo. Estas equações relacionam a Intensidade, Duração e Frequência de Excedência (ou Tempo de Retorno) das séries de dados estudados, e são da forma da Equação 3.1:

$$I = \frac{a TR^b}{(t_d + c)^d} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

$I$ : Intensidade da chuva (mm/hora)

$TR$ : Tempo de Retorno (anos)

$t_d$ : duração da chuva de projeto (mm)

$a, b, c, d$ : parâmetros característicos da IDF (-)

Para a determinação da chuva de projeto através de curvas IDF no modelo desenvolvido, pode ser selecionada uma localidade que já tenha os parâmetros da equação previamente adicionados no modelo (Tabela 3.2. Parâmetros da Equação IDF para diversas cidades do Brasil) ou podem ser inseridos manualmente os parâmetros da equação.

**Tabela 3.2. Parâmetros da Equação IDF para diversas cidades do Brasil**

Localidade	Parâmetros			
	a	b	c	d
Aracaju/SE	834,205	0,179	15	0,726
Belém/PA	1085,508	0,156	12	0,758
Belo Horizonte/MG	1447,87	0,1	20	0,84
Brasília/DF	1574,7	0,207	8	0,884
Cuiabá/MT	1016,453	0,133	7,5	0,739
Curitiba/PR	5726,64	0,159	41	1,041
Florianópolis/SC	222	0,1648	0	0,3835
Fortaleza/CE	2345,29	0,173	28,31	0,904
Goiânia/GO	920,45	0,1422	12	0,7599
Manaus/AM	1136,504	0,158	10	0,764
Porto Alegre/RS (8° DISMET)	1297,9	0,171	11,619	0,85
Porto Alegre/RS (IPH/UFRGS)	509.859	0.196	10	0.72
Porto Velho/RO	1181,37	0,159	11	0,757
Rio Branco/AC	1419,345	0,162	18	0,795
Rio de Janeiro/RJ	1239	0,15	20	0,74
São Luiz/MA	1519,371	0,161	28	0,777
São Paulo/SP	3462,6	0,172	22	1,025
Teresina/PI	1248,856	0,177	10	0,769

Fonte: COLLISCHONN e DORNELLES, 2013

Importante ressaltar que estas equações normalmente não permitem estimar precipitações com Tempo de Retorno muito superior a 100 anos (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

#### 3.1.1.4.1 Duração da chuva de projeto

Segundo COLLISCHONN e DORNELLES (2013), a duração de uma chuva de projeto deve ser definida de forma a garantir que toda a bacia esteja contribuindo ao mesmo tempo com o escoamento que chega ao exutório da bacia. Por esse motivo, a duração da chuva de projeto deve ser igual ou superior ao tempo de concentração da bacia.

Observando curvas IDF, é perceptível que, à medida que aumenta a duração das chuvas, a intensidade diminui. Desta forma, admite-se que as chuvas que causam as situações mais críticas em uma bacia têm duração aproximadamente igual ao tempo de concentração da bacia. Assim, considera-se que as chuvas de projeto tenham duração igual, ou bastante próxima, ao tempo de concentração da bacia.

#### 3.1.1.4.2 Distribuição temporal

Para a definição de uma chuva de projeto a partir de uma relação IDF, é necessário realizar algum procedimento para redistribuição temporal da chuva gerada pela equação. Um método frequentemente utilizado é conhecido como método dos blocos alternados. O modelo desenvolvido utiliza este método para a redistribuição temporal da chuva, caso o usuário deseje utilizar uma equação IDF para a determinação da chuva de seu projeto.

No método dos blocos alternados, a curva IDF é utilizada para calcular intensidades para diferentes durações de chuva, menores que a duração da chuva de projeto. Os valores incrementais são reorganizados de forma que o máximo incremento ocorra, aproximadamente, no meio da duração da chuva total. Os incrementos (ou blocos de chuva) seguintes são reposicionados alternadamente antes e depois do bloco de chuva mais intensa, até preencher toda a duração.

#### 3.1.1.4.3 Atenuação das chuvas com a área

Usualmente é empregado um fator para correção do valor da chuva que atinge as bacias hidrográficas, visto que quanto maior a área da bacia, menor a probabilidade de elas terem toda a sua extensão atingida simultaneamente por chuvas intensas. O fator de redução é obtido empiricamente, a partir de um grande número de pluviógrafos localizados em uma mesma região, ou a partir de dados de chuva estimada por radar ou satélite.

O fator de atenuação das chuvas com a área pode ser inserido diretamente no local indicado no programa, ou calculado internamente, utilizando a equação determinada por Silveira (2001) para a cidade de Porto Alegre (Equação 3.3).

$$F_{RA} = 1 - \frac{\sqrt{A}}{27,3 \times t^{0,215}} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

$F_{RA}$ : Fator de Redução Areal (-)

$A$ : área da bacia (km<sup>2</sup>)

$t$ : duração da chuva (min)

### 3.1.2 Processamento dos dados: Método SCS

Os dados de entrada são processados dentro do modelo em duas etapas principais: a separação do escoamento pelo método SCS, onde é determinada a parcela da precipitação que irá escoar superficialmente na bacia, e a propagação superficial, que utiliza o hidrograma unitário sintético triangular SCS para determinar o hidrograma de projeto.

#### 3.1.2.1 Separação do escoamento

A separação do escoamento é a etapa do método SCS que consiste na determinação volume de água que entra na bacia através da precipitação que será escoado superficialmente na bacia, através de um balanço hídrico. A precipitação que cai sobre uma bacia hidrográfica pode seguir quatro caminhos potenciais (USDA, 2010): parte da precipitação é interceptada pela vegetação e evaporada para a atmosfera; parte cairá sobre o solo e irá evaporar; parte irá infiltrar no solo; e o restante irá escoar superficialmente na bacia. A quantidade de precipitação e o parâmetro  $CN$ , descrito anteriormente, irão determinar a quantidade de água que irá escoar na bacia e encontrar os cursos d'água superficiais.

Esta separação do escoamento no Método SCS é realizada através da a Equação 3.3.

$$V = \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

$V$ : volume superficial acumulado (mm).

$P$ : precipitação total acumulada (mm).

$I_a$ : perdas iniciais (mm).

$S$ : capacidade máxima de armazenamento da camada superior do solo (mm).

O parâmetro  $I_a$  representa as “perdas” de água que ocorrem antes do escoamento começar, ou seja, é a porção do volume de água precipitado que não é escoado superficialmente, seja por interceptação na vegetação, evaporação, infiltração ou outras causas. Este é um parâmetro bastante variável, mas geralmente se relaciona

com parâmetros do solo e da cobertura da bacia. Estudos em pequenas bacias agrícolas (USDA, 1986), indicaram que o valor das perdas iniciais é pode ser estimado para as condições médias como sendo 20% da capacidade de armazenamento do solo (Equação 3.4).

$$I_a = 0,2 S \quad \text{Equação 3.4}$$

A determinação do parâmetro  $S$  foi estabelecida através de uma escala onde a variável é o parâmetro  $CN$ . A Equação 3.5 representa relação entre o parâmetro  $CN$  e a variável  $S$ . A equação está convertida para unidades métricas, já que a versão original da equação de USDA (1986), que estabelece o valor de  $CN$  numa escala de 1 a 100, foi determinada utilizando unidades inglesas.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Equação 3.5}$$

### 3.1.2.2 Propagação superficial

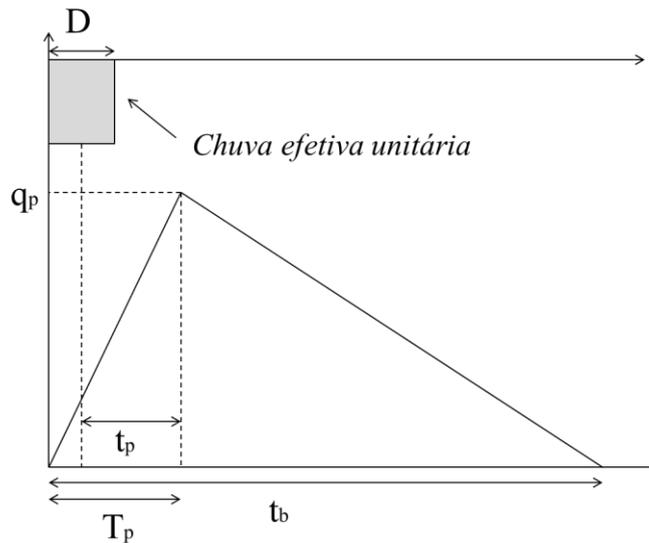
Nesta etapa da metodologia, o volume gerado pela separação do escoamento é propagado pela bacia hidrográfica até o rio, através de um hidrograma unitário. O hidrograma unitário é a resposta da bacia causada por uma chuva efetiva unitária. A teoria do hidrograma unitário considera que a precipitação efetiva unitária tem intensidade constante e atinge uniformemente a bacia hidrográfica, e que a bacia hidrográfica tem um comportamento linear, portanto os princípios de proporcionalidade e superposição podem ser aplicados.

A partir de um estudo com um grande número de bacias e de hidrogramas unitários nos Estados Unidos, foi verificado por técnicos do Departamento de Conservação de Solo (*Soil Conservation Service*, SCS – atualmente *Natural Resources Conservation Service*, NRCS) que hidrograma unitários podem ser aproximados por relações de tempo e vazão estimadas com base no tempo de concentração e na área das bacias (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

O modelo SCS utiliza o hidrograma unitário sintético triangular, é da forma do hidrograma da Figura 3.5. A forma do hidrograma unitário depende da área da bacia hidrográfica, da duração da chuva efetiva unitária e do tempo de concentração da bacia.

O hidrograma unitário é definido por cinco parâmetros: a duração da chuva efetiva unitária ( $D$ ); o tempo de pico ( $t_p$ ), que é o tempo desde a metade da duração da

chuva efetiva unitária até o pico de vazão do hidrograma unitário, calculado pela Equação 3.6; o tempo de subida do hidrograma ( $T_p$ ), que é o tempo desde o início do evento chuvoso até o pico do hidrograma unitário, calculado pela Equação 3.7; o tempo de base ( $t_b$ ), que é o tempo desde o início do evento chuvoso até o final do escoamento superficial no exutório da bacia, calculado pela Equação 3.8; e a vazão de pico do hidrograma unitário ( $q_p$ ), calculada pela Equação 3.9.



**Figura 3.5. Hidrograma unitário triangular do SCS**

$$t_p = 0,6 T_c \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde:

$T_c$ : tempo de concentração da bacia (horas)

$$T_p = t_p + \frac{D}{2} \quad \text{Equação 3.7}$$

$$t_b = T_p + 1,67 T_p \quad \text{Equação 3.8}$$

$$q_p = \frac{0,208 A}{T_p} \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde:

A: Área da bacia hidrográfica (km<sup>2</sup>).

$T_p$ : Tempo de subida do hidrograma (horas).

D: Duração da chuva efetiva unitária (horas).

A chuva efetiva unitária deve ter uma duração 5 a 10 vezes menor que o tempo de concentração da bacia. Aplicando os princípios de proporcionalidade e de superposição, o programa utiliza o hidrograma unitário para calcular os hidrograma

resultantes de eventos chuvosos complexos, através de um operador matemático chamado convolução.

### 3.1.3 Dados de saída

A Convolução do hidrograma unitário para a chuva de projeto gera como resultado o hidrograma final de vazões, que pode ser visualizado diretamente no programa, sob a forma gráfica ou sob a forma de tabela, que permite que o usuário copie os valores para fora do programa. Estes dados também podem ser exportados como um arquivo de texto no formato ASCII.

## 3.2 Módulo de propagação de vazão em reservatórios

O hidrograma gerado no módulo chuva-vazão é um dos dados de entrada no módulo de propagação em reservatório, juntamente com informações de geometria do reservatório em questão. Neste módulo é utilizado o método de Puls que gera o hidrograma propagado, que pode ser comparado ao hidrograma de projeto para verificar a eficiência do reservatório em amortecer as cheias.

A Figura 3.6 mostra a janela do módulo de propagação de vazão em Reservatórios, com todas as suas opções de cálculo, que serão detalhadas a seguir, e a Figura 3.7 mostra a estrutura do módulo.

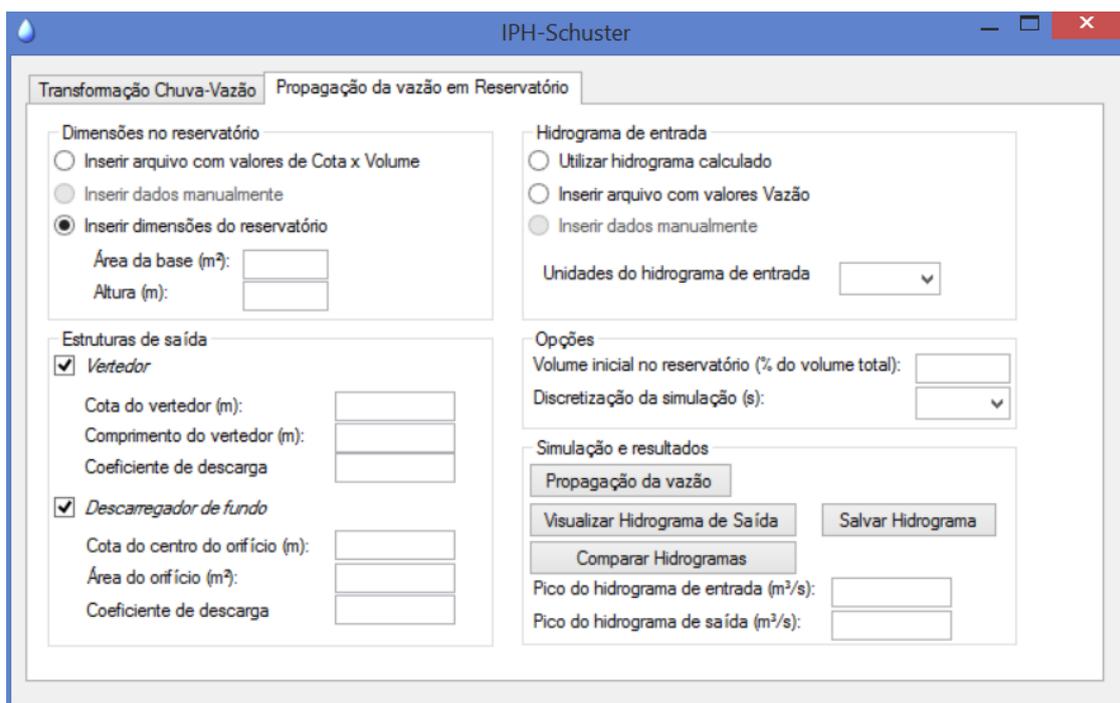


Figura 3.6. Janela do módulo de vazão em Reservatório

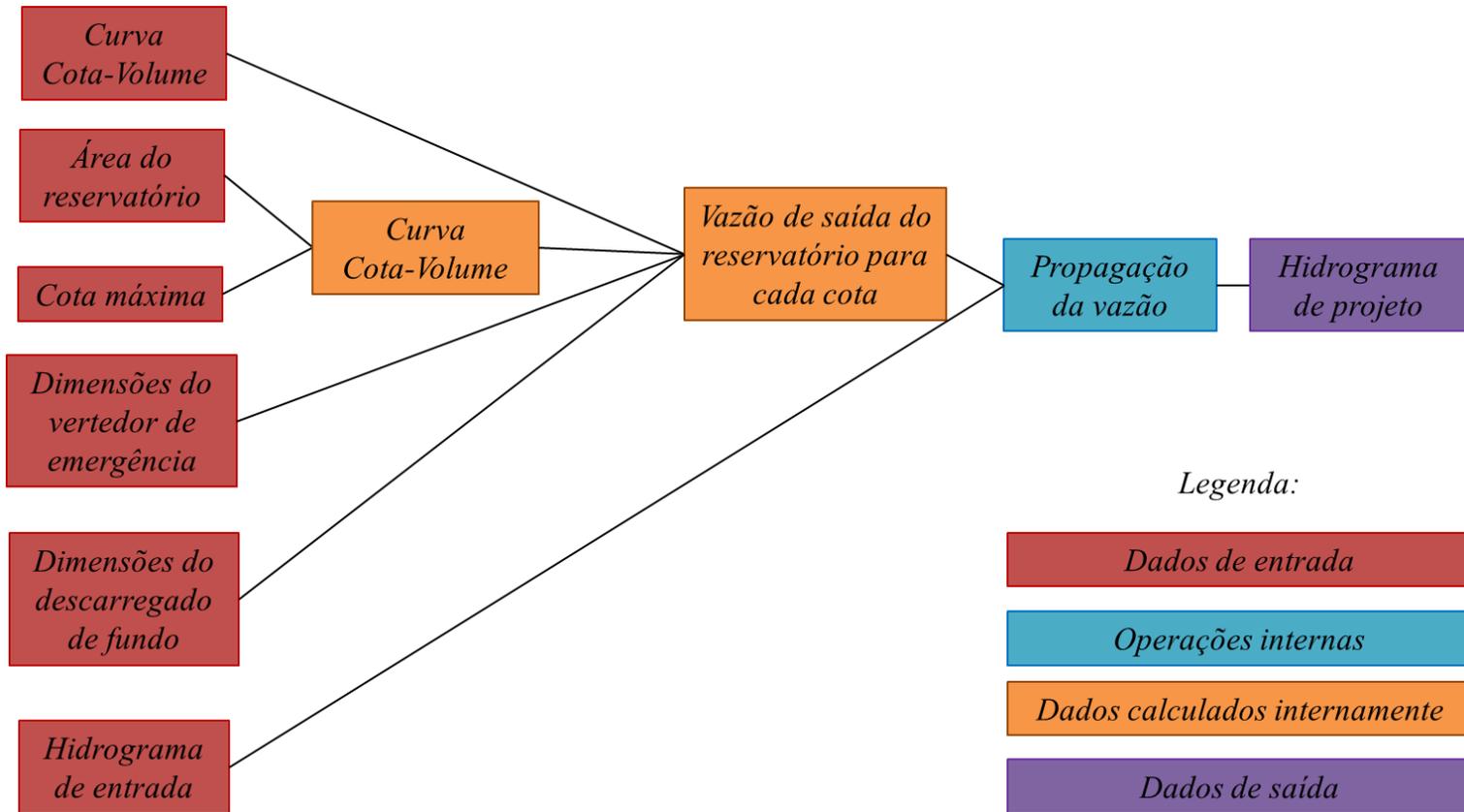


Figura 3.7. Estrutura do módulo de propagação de vazão em reservatórios.

### 3.2.1 Dados de entrada

Os dados de entrada necessários para este módulo são o hidrograma de projeto a ser propagado, gerado no módulo de transformação chuva-vazão, informações de geometria do reservatório e das estruturas de saída deste. Se o usuário já possuir um hidrograma de projeto, ele pode ser adicionado diretamente ao programa, sem ser necessária a utilização do módulo chuva-vazão.

Para realizar os cálculos, o modelo necessita que sejam informadas dimensões do reservatório que permitam a determinação do volume armazenado pelo mesmo quando ocupado por diferentes lâminas d'água, ou ainda, essas dimensões podem ser informadas ao modelo através de uma curva cota-volume inserida diretamente na tela do programa, ou através de um arquivo de texto no formato ASCII. Alternativamente, as dimensões básicas de reservatórios em forma de prisma podem ser informadas e o programa calcula internamente a curva cota-volume.

Os reservatórios geralmente possuem dois tipos de estruturas de saída: vertedor, também conhecido como sangradouro ou vertedouro; e descarregador de fundo. Vertedores são extravasadores de superfície, que permitem a passagem das maiores cheias sem comprometer a segurança do reservatório. Descarregadores de fundo são estruturas localizadas na parte inferior da barragem, que liberam aos poucos o volume de água acumulado no reservatório durante uma cheia. Os descarregadores de fundo têm função de permitir o esvaziamento completo do reservatório, deixando o volume de espera disponível para amortecer uma próxima cheia, ou de permitir a descarga de vazões controladas para jusante quando a barragem não está vertendo.

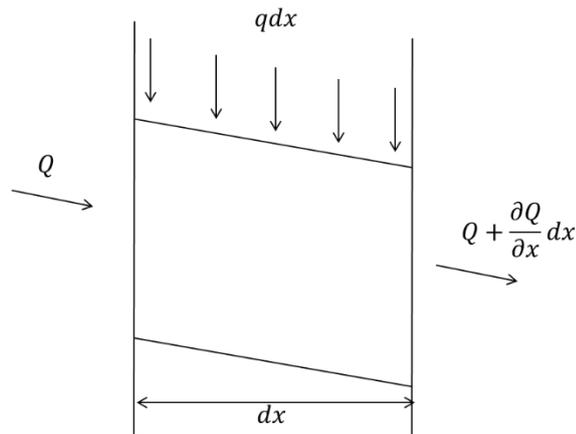
Para o cálculo da vazão de saída do reservatório, são necessários o comprimento da soleira do vertedor, a área e a altura do orifício, que devem ser inseridos diretamente na janela do modelo.

### 3.2.2 Processamento dos dados: Método de Puls

Conforme citado anteriormente, o método de Puls é um dos mais conhecidos para a simulação do escoamento em reservatórios e utiliza a equação de continuidade concentrada. A equação da continuidade, expressa pela Equação 3.10, admite uma função contínua das variáveis ao longo de todo o trecho em estudo. Esta equação é definida, considerando um trecho  $dx$  (Figura 3.8) com escoamento superficial livre, o

volume que entra na seção de montante, no intervalo de tempo  $dt$  é igual a  $Qdt$ . O volume que entra por contribuição lateral é  $qdxdt$ . O volume que sai na seção de jusante é  $\left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx\right)dt$ . O volume armazenado no trecho  $dx$  no intervalo  $dt$  é  $\frac{\partial A}{\partial t} dxdt$ .

$$\frac{\partial A}{\partial t} dxdt = Qdt + qdxdt - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx\right)dt \quad \text{Equação 3.10}$$



**Figura 3.8. Termos da equação da continuidade**

Considerando um trecho definido, onde o hidrograma de entrada é dado por  $I_t$ , o hidrograma de saída  $Q_t$  e o armazenamento de água dentro desse trecho  $S_t = A_T dx$  e desprezando-se a variabilidade espacial da área  $A_T$ , a equação fica (Equação 3.11):

$$\frac{dS_t}{dt} = I_t - Q_t \quad \text{Equação 3.11}$$

A Equação 3.11 representa a equação de continuidade concentrada. Discretizando a Equação 3.11, é obtida a Equação 3.12.

$$\frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t+1}}{2} - \frac{Q_t + Q_{t+1}}{2} \quad \text{Equação 3.12}$$

Onde:

$I_t$  e  $I_{t+1}$ : vazões de entrada no reservatório em t e t+1;

$Q_t$  e  $Q_{t+1}$ : vazões de saída do reservatório em t e t+1;

$S_t$  e  $S_{t+1}$ : armazenamento do reservatório em t e t+1.

Em simulações de reservatórios, as variáveis conhecidas são o hidrograma de entrada no reservatório ( $I_t$  em todos os intervalos de tempo, que provêm do hidrograma

inserido pelo usuário ou determinado no módulo chuva-vazão) e o volume armazenado inicial no reservatório ( $S_t$  em  $t=0$ , ou  $S_0$ , que deve ser definido pelo usuário), e as incógnitas são  $Q_{t+1}$  e  $S_{t+1}$ .

Reorganizando a Equação 3.12, separando as variáveis conhecidas de um lado e as desconhecidas de outro, surge a Equação 3.13.

$$\frac{2S_{t+1}}{\Delta t} + Q_{t+1} = I_t + I_{t+1} + \frac{2S_t}{\Delta t} - Q_t \quad \text{Equação 3.13}$$

Como existem duas incógnitas, é necessária uma equação adicional para a resolução do sistema. Esta equação adicional é a relação entre o armazenamento no reservatório  $S$  e a vazão de saída  $Q$ . Normalmente esta relação é feita através de uma função da forma da Equação 3.14.

$$Q_{t+1} = f\left(\frac{2S_t}{\Delta t} + Q_t\right) \quad \text{Equação 3.14}$$

A função  $f$  é estabelecida através da relação cota x volume do reservatório. A partir das dimensões das estruturas de saída, é possível estabelecer uma relação entre a cota do reservatório e a vazão de saída do reservatório.

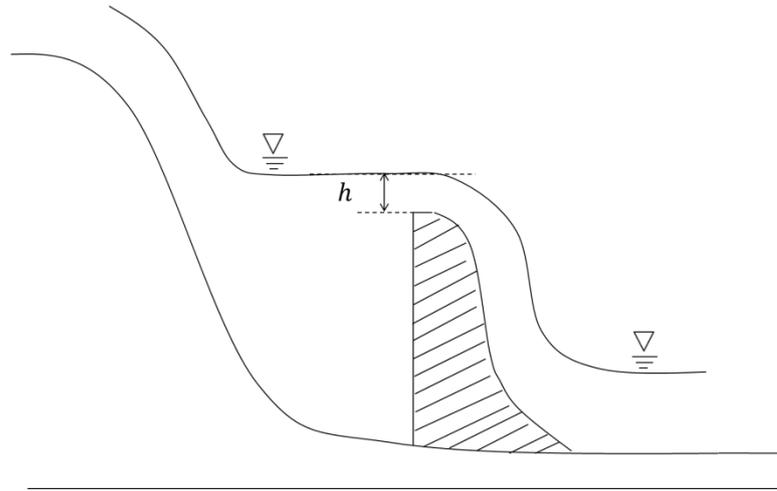
A vazão em um vertedor livre é expressa pela Equação 3.15. A Figura 3.9 mostra um vertedor livre com as duas cotas envolvidas na Equação 3.15.

$$Q = C L h^{\frac{3}{2}} \quad \text{Equação 3.15}$$

$C$ : coeficiente de descarga do vertedor.

$L$ : largura do vertedor.

$h$ : diferença da cota do nível da água no reservatório e da cota da soleira do vertedor.



**Figura 3.9. Vertedor livre**

A equação da vazão em um descarregador de fundo é dada pela Equação 3.16. A Figura 3.9 mostra um barramento de reservatório com orifício com as duas cotas envolvidas na equação.

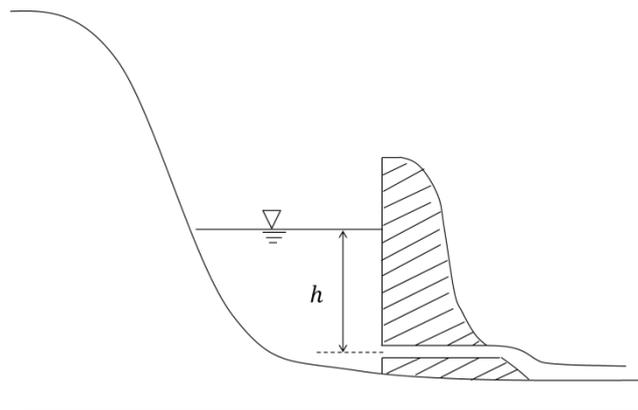
$$Q = C' A_o \sqrt{2 g h'} \quad \text{Equação 3.16}$$

$C'$ : coeficiente de descarga do descarregador de fundo.

$A_o$ : área do orifício.

$g$ : aceleração da gravidade.

$h'$ : altura da água desde a superfície até o eixo do orifício.



**Figura 3.10. Descarregador de fundo**

Para cada valor de cota que pode ser atingida no reservatório, é calculado um valor de vazão ( $Q$ ), a partir das equações Equação 3.15 e Equação 3.16, que deve ser somado a um valor de volume ( $S$ ) multiplicado por 2, dividido pelo intervalo de tempo

de cálculo. Desta forma, os valores de vazão serão as ordenadas e os valores de  $Q + \frac{2S}{\Delta t}$  serão a abcissas da função  $f$ .

De posse de todas estas informações, é possível simular o escoamento através do reservatório pela seguinte sequência de passos:

1. A partir do valor de  $S_0$  definido e da relação entre  $S$  e  $Q$ , é determinado  $Q_0$ .
2. Para o intervalo de tempo seguinte, é calculado o termo da direita da Equação 3.13.
3. O valor definido no passo anterior é a abcissa da Equação 3.14, assim é obtido o valor de  $Q_{t+1}$ .
4. O valor de  $S_{t+1}$  é definido a partir da Equação 3.13, tendo apenas esta variável como incógnita.
5. Os passos 2 até 4 são repetidos para todos os intervalos de tempo.

### 3.2.3 Dados de saída

Os valores de  $Q_0$  e  $Q_{t+1}$  definidos para todos os intervalos de tempo podem ser visualizados no programa através de um hidrograma e comparado com o hidrograma de projeto. Os valores do hidrograma de saída podem ser visualizados em forma de tabela no programa, ou exportados como um arquivo de texto no formato ASCII. No programa, são mostradas as vazões de pico dos hidrogramas de entrada e de saída do reservatório, assim é possível verificar a capacidade do hidrograma em amortecer cheias.

## 4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO METODOLÓGICA

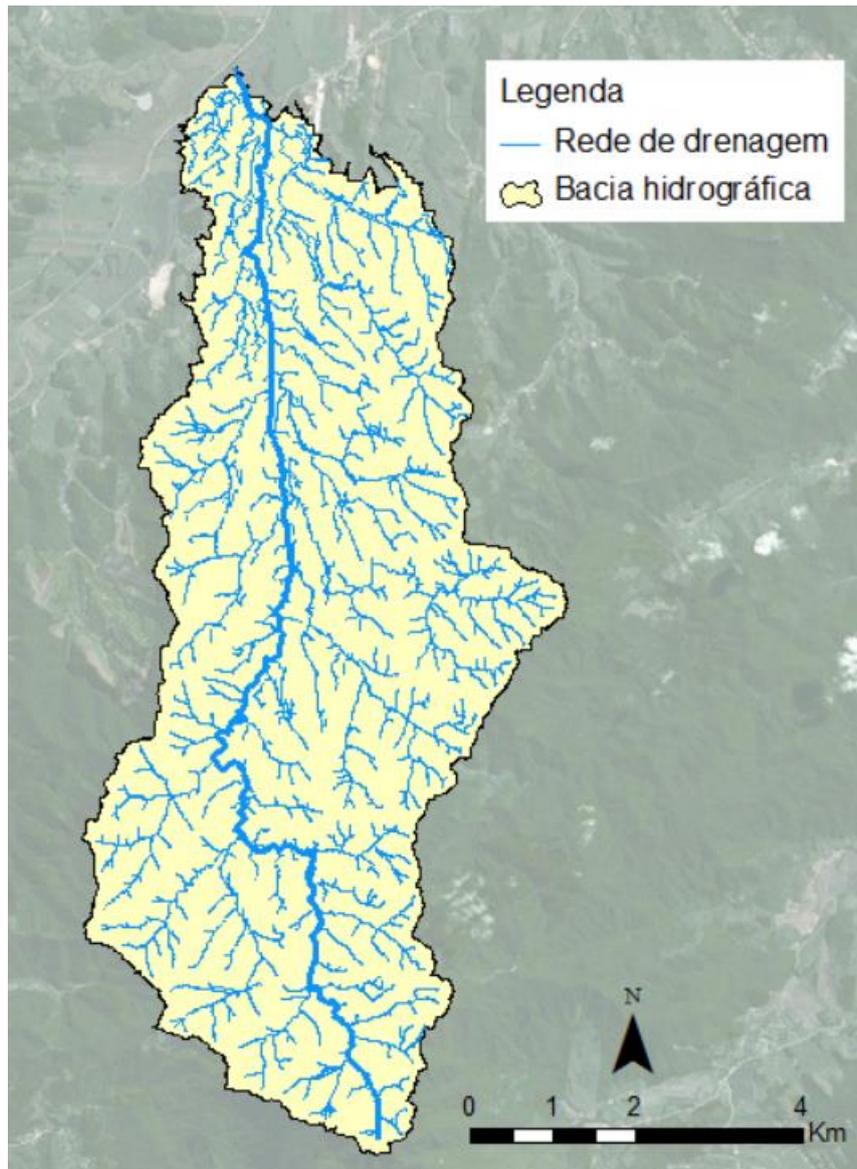
Este capítulo apresenta dois exemplos de aplicação metodológica do modelo desenvolvido. Um exemplo compara os resultados obtidos no módulo de transformação chuva-vazão, com resultados para a mesma situação no software IPHS1. O segundo exemplo foi retirado do livro Hidrologia para engenharia e ciências ambientais (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013), e compara os resultados do modelo desenvolvido com os resultados apresentados no livro.

### 4.1 *Módulo de transformação chuva-vazão*

O local selecionado para aplicação é uma bacia rural no estado de Santa Catarina, entre os municípios de Brusque e Itajaí. A bacia em questão faz parte da bacia hidrográfica do Rio Itajaí.

A delimitação desta bacia e de sua rede de drenagem foi realizada no software MapWindow GIS, através do Plug-in IPH Hydro Tools, a partir de um Modelo Digital de Elevação com resolução espacial de 1 metro (Figura 4.1). O modo de obtenção das informações necessárias para a aplicação do Módulo de transformação chuva-vazão é descrito a seguir:

- Área da bacia: foi determinada no software MapWindow GIS, através de ferramenta específica para o cálculo de áreas. A área da bacia é de 54 km<sup>2</sup>.



**Figura 4.1. Contorno da bacia hidrográfica.**

- Parâmetro CN: foi determinado a partir da combinação do mapa de solos da Embrapa na escala 1:5.000.000 (Figura 4.2) e do mapa de cobertura vegetal do bioma Mata Atlântica, disponibilizado pelo Ministério do Meio Ambiente (Figura 4.3). Cruzando os dois mapas, através de técnicas de geoprocessamento, foram definidas as combinações de solo e cobertura vegetal na bacia (Tabela 4.1). Foi estimado um valor de CN para cada combinação, através da classificação de solos e da tabela de CN em anexo. Após, foi feita uma média ponderada pela área destes valores, assim, foi determinando como 73 o CN médio da região.

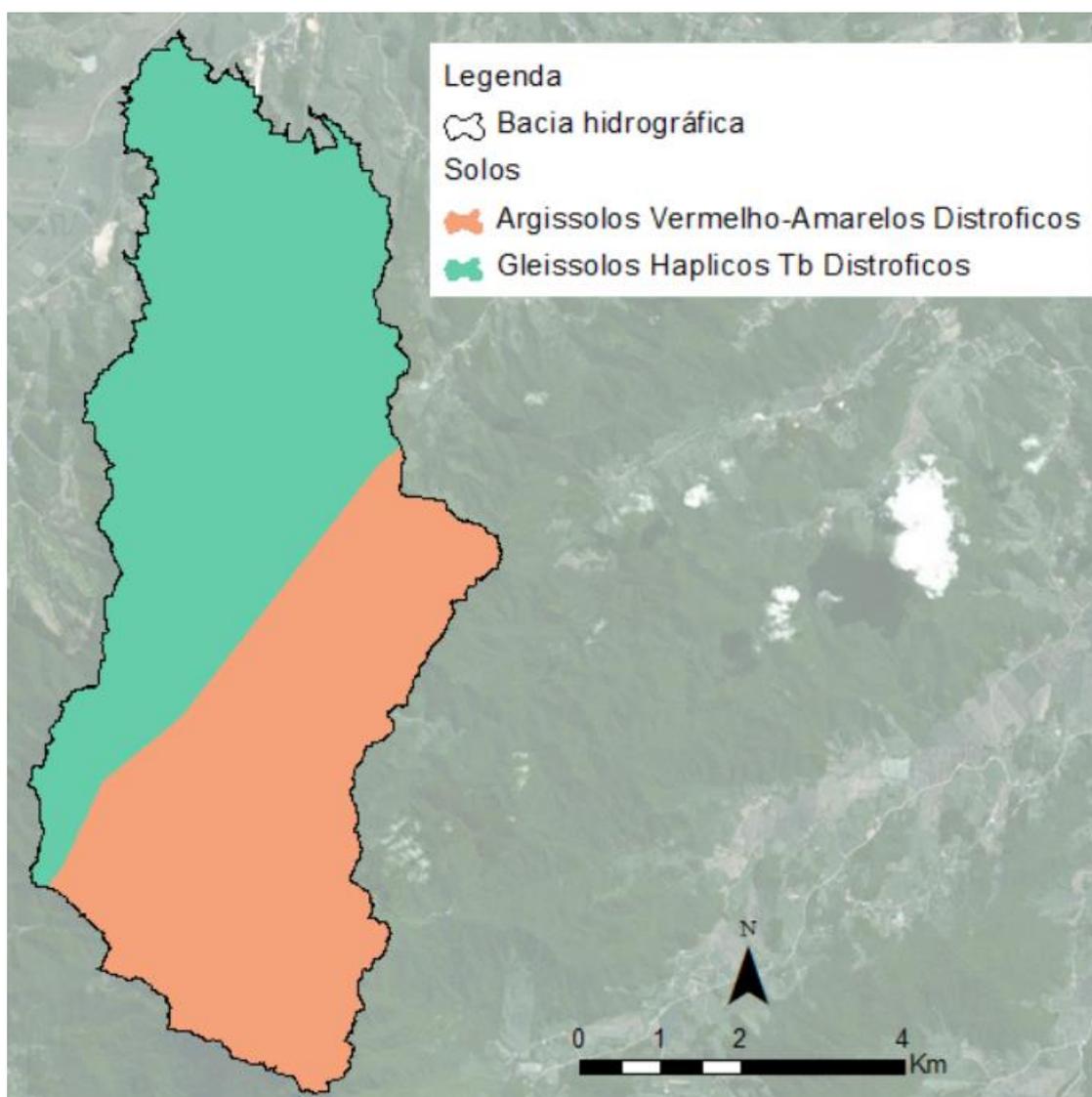


Figura 4.2. Mapa de solos para a área da bacia.

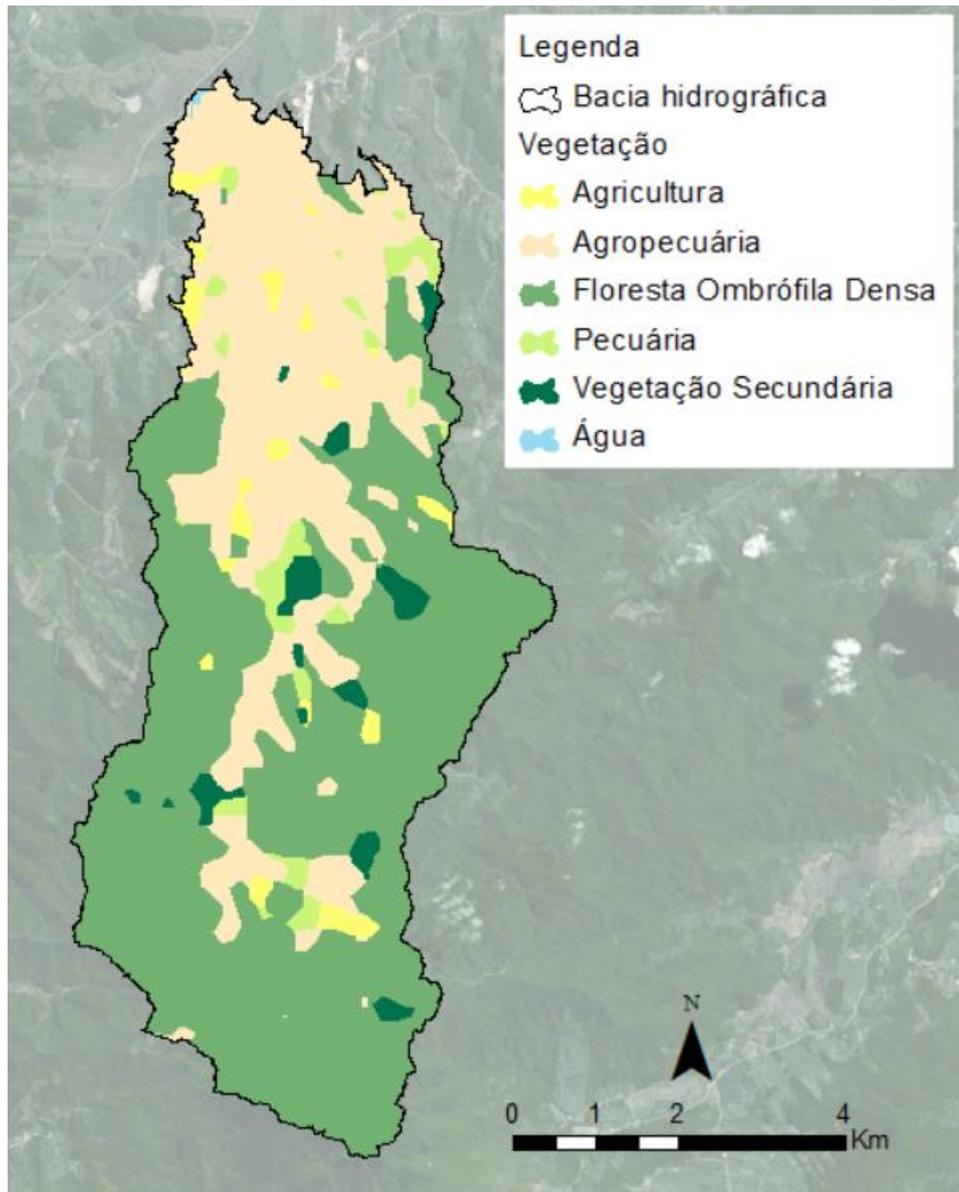


Figura 4.3. Mapa de cobertura vegetal para a área da bacia.

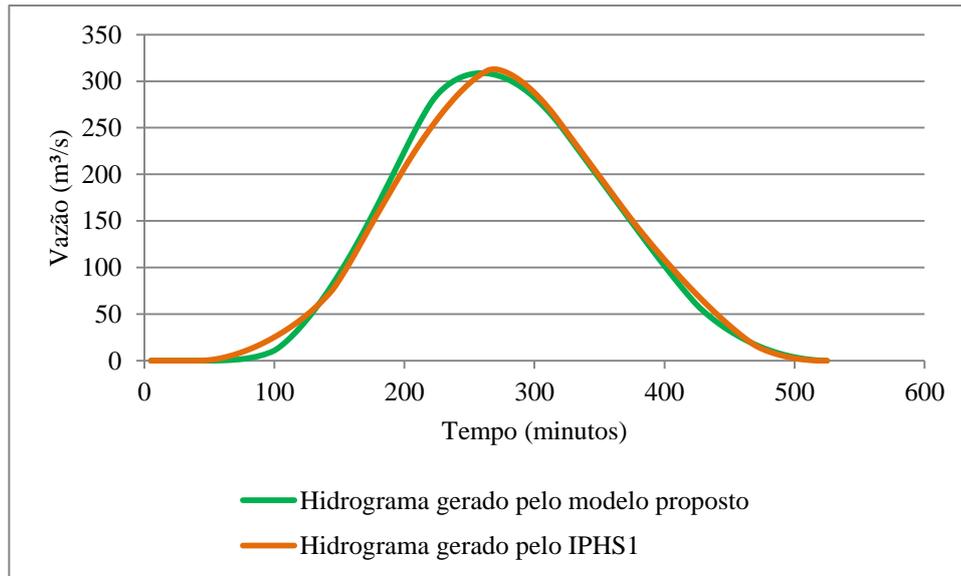
Tabela 4.1. Combinações de tipos de solo e cobertura na bacia.

Solo	Cobertura	Área (km <sup>2</sup> )	CN	% da área
Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos	Agricultura	0,5	84	1%
Gleissolos Háplicos Tb Distróficos	Agricultura	1,0	88	2%
Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos	Agropecuária	2,1	84	4%
Gleissolos Háplicos Tb Distróficos	Agropecuária	15,3	88	28%
Gleissolos Háplicos Tb Distróficos	Água	0,0	100	0%
Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos	Floresta Ombrófila Densa	20,9	62	39%
Gleissolos Háplicos Tb	Floresta Ombrófila	10,8	69	20%

Solo	Cobertura	Área (km <sup>2</sup> )	CN	% da área
Distróficos	Densa			
Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos	Pecuária	0,5	75	1%
Gleissolos Háplicos Tb Distróficos	Pecuária	1,2	83	2%
Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos	Vegetação Secundária	0,9	70	2%
Gleissolos Háplicos Tb Distróficos	Vegetação Secundária	0,8	76	1%

- Para o cálculo do tempo de concentração, foi selecionada a equação do *Corps of Engineers*, adequada para bacias rurais com áreas menores que 12.000 km<sup>2</sup> (conforme a Tabela 3.1), que exige o comprimento e a declividade média do rio principal. O comprimento do rio principal foi determinado no software MapWindow GIS, sendo 17 km, e a declividade média foi calculada a partir dos valores de altitude no início e fim do trecho de rio principal obtidos no MDE, obtidos com o Modelo Digital de Elevação. A declividade média calculada foi de 0,025 m/m. O modelo calculou um valor de Tempo de Concentração de 198.94 minutos.
- A chuva de projeto foi obtida a partir da IDF de Florianópolis, com duração de 200 minutos e Tempo de Retorno de 10 anos.

Todos estes dados foram inseridos no modelo desenvolvido e no IPHS1. Os hidrogramas gerados pelos dois modelos foram bastante semelhantes graficamente, conforme pode ser visualizado na Figura 4.4. Vazão de pico gerada pelo modelo foi de 308,67 m<sup>3</sup>/s e o volume total do hidrograma foi de 3.473.138,72 m<sup>3</sup>. A vazão de pico gerada no IPHS1 foi de 312,83 m<sup>3</sup>/s, e o volume total do hidrograma foi de 3.489.120,90 m<sup>3</sup>. A comparação mostra que o modelo desenvolvido está produzindo resultados coerentes.

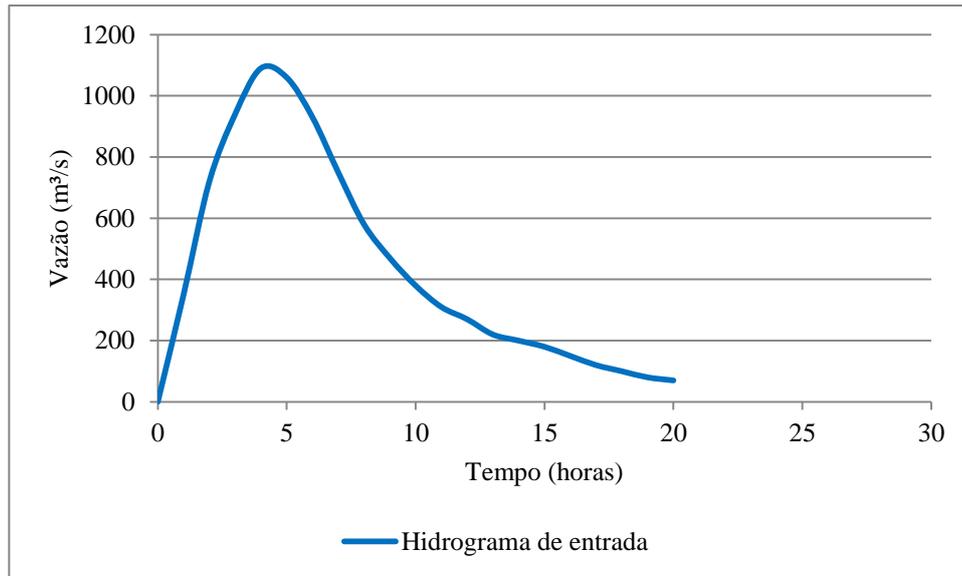


**Figura 4.4. Hidrogramas gerados no módulo chuva-vazão no modelo proposto e no IPHS1.**

#### **4.2 Módulo de propagação de vazão em reservatórios**

O exemplo para este módulo foi retirado do capítulo 16 do livro Hidrologia para engenharia e ciências ambientais (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). Neste exemplo didático, são dados de entrada um hidrograma, uma tabela cota x volume do reservatório, a dimensão das estruturas de saída e o volume inicial do reservatório.

O hidrograma de entrada, cuja vazão de pico é de 1090 m<sup>3</sup>/s, é mostrado na Figura 4.5, a Tabela 4.2 mostra a relação cota x volume, um vertedor de 25 metros de largura é a única estrutura de saída, e o volume inicial do reservatório é de 20.000.000 m<sup>3</sup>.



**Figura 4.5. Hidrograma de entrada no módulo de propagação de vazão em reservatório**

**Tabela 4.2. Tabela Cota x Volume do reservatório**

Cota (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
115	19000000
120	20000000
121	20080000
122	20380000
123	21020000
124	22080000
125	23620000
126	25690000
127	28340000
128	31630000
129	35600000
130	40290000

Estes dados foram inseridos no modelo desenvolvido e o hidrograma propagado através do reservatório gerado foi comparado ao hidrograma apresentado no livro. A vazão de pico do hidrograma produzido no modelo é de 718,91 m<sup>3</sup>/s, enquanto que no livro, a vazão de pico foi de 718,69 m<sup>3</sup>/s, portando, conclui-se que o modelo está produzindo resultados coerentes.

A Figura 4.6 mostram os hidrogramas gerados pelo modelo e o do livro, os hidrogramas são iguais, a única diferença visual entre os dois hidrogramas é que o

gerado pelo modelo tem o final prolongado, enquanto que o exemplo de livro tem seu final truncado.

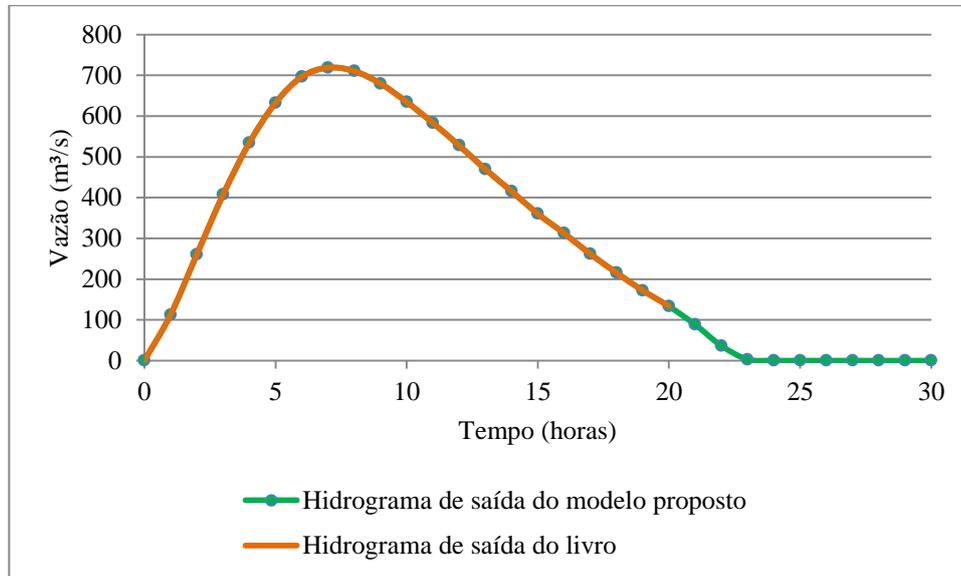


Figura 4.6. Comparação entre os hidrogramas de saída do modelo proposto e do exemplo do livro.

## 5 LIMITAÇÕES DO MODELO

Este método de transformação chuva-vazão é criticado por diversos autores por motivos como a base física frágil que dá origem às equações do modelo, que não consideram a duração da chuva na geração do escoamento (Equação 3.3). A hipótese de que perdas iniciais correspondem a 20% da capacidade de armazenamento do solo também é discutível.

Outra crítica é que os valores tabelados do parâmetro  $CN$  foram obtidos com base em experimentos realizados apenas em bacias nos Estados Unidos, portanto estes valores devem ser determinados com dados locais ou de bacias mais próximas geograficamente da área do projeto em questão (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Algumas limitações do método SCS informadas em USDA (1986):

- O modelo foi baseado em escoamento não confinado e aberto sobre a terra ou em canais. Para eventos de grande duração, onde o escoamento se divide entre a superfície e sistemas de canais subterrâneos, mais parâmetros hidráulicos são necessários para a determinação do  $T_c$ .

- O parâmetro  $CN$  descreve condições médias adequadas para o propósito de dimensionamento. Se o objetivo for a modelagem de um evento histórico de chuva, os resultados são menos exatos.

- O modelo não contabiliza a variação de  $CN$  que pode ocorrer durante o evento de chuva, ou os efeitos que a intensidade da precipitação pode causar neste parâmetro.

- A determinação dos parâmetros  $CN$ ,  $I_a$  e  $S$  conforme o modelo SCS são formas simplificadas, e dependendo do caso, metodologias específicas para cada área devem ser desenvolvidas para a obtenção de melhores resultados.

- Esta metodologia não é adequada para bacias onde o  $CN$  ponderado calculado é menor de 40.

- O modelo é não adequado para a estimativa de escoamento devido ao derretimento de neve ou de chuva em solos congelados.

- O modelo se aplica somente para escoamento superficial direto. Solos do grupo hidrológico A e florestas com valores relativamente baixos de *CN* podem estar relacionados a grandes fontes de fluxo de água subterrâneo ou níveis elevados de água no solo, que contribuem para o escoamento.

A teoria do hidrograma unitário também não é inteiramente correta, por exemplo, o escoamento não é gerado de forma uniforme espacialmente em toda a bacia, e também não ocorre uniformemente no tempo.

As curvas IDF utilizadas neste modelo também têm suas limitações. Normalmente estas curvas não permitem estimar precipitações para tempos de retorno muito superiores a 100 anos, e as curvas valem para durações de chuva de cerca de 10 minutos até de 24 horas.

O método de Puls possui a limitação de só poder ser aplicado em reservatórios relativamente curtos e profundos, onde é válida a hipótese de que o nível da água no interior do reservatório é horizontal.

Se as limitações dos diferentes métodos que compõem este modelo hidrológico forem consideradas, o modelo pode ser utilizado para o pré-dimensionamento e determinação do posicionamento de reservatórios para amortecimento de cheias. O pré-dimensionamento de um reservatório pode ser realizado através da variação dos atributos do reservatório, como seu volume, o armazenamento inicial e as características da estruturas de saída, e verificando a resposta do reservatório ao hidrograma de projeto.

Para a determinação do posicionamento de um reservatório, a localização do reservatório pode ser alterada, modificando assim, a área da bacia hidrográfica a montante do reservatório, o que altera o hidrograma de projeto. A resposta do reservatório a diferentes hidrogramas de projeto pode levar o usuário a encontrar facilmente a melhor localização para o seu reservatório.

## **6 CONCLUSÕES**

O modelo desenvolvido possui como vantagens o fato de ser simples, didático e utilizar métodos amplamente conhecidos e reconhecidos por um grande número de usuários e agências governamentais.

Este trabalho atendeu aos objetivos aos que foi proposto, tendo o modelo proposto gerado resultados coerentes. A estrutura do programa possibilita que módulos sejam facilmente adicionados, acrescentando funcionalidades ao programa.

O modelo será disponibilizado livremente, juntamente com seu código-fonte, de forma que possa ser adaptado e aprimorado por usuários e estudiosos.

## 7 REFERÊNCIAS

APPLEBY, D. 1991. Programming languages: paradigm and practice. NY McGraw-Hill. New York, United Stated.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, J. M. 1979. *A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin.*

COLLISCHONN, W. 2001. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. Tese de Doutorado. IPH/UFRGS. Porto Alegre.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. 2013. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). Porto Alegre.

FAN, F. M. 2013. Simulação dos impactos de lançamentos de poluentes sobre a qualidade da água de bacias hidrográficas integrada com Sistema de Informação Geográfica. Dissertação de mestrado. IPH, UFRGS.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. 2013. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistemas de Informação Geográfica. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 19 n.1.

FCTH, Fundação o Centro Tecnológico de Hidráulica. s/d. Diretrizes Básicas para Projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo. Prefeitura do Município de São Paulo.

GABRIELLI, M. & MARTINI, S. 2010. Programming Languages: Principles and Pardigms. London Springer. Università di Bologna, Bologna, Itália.

HORTON, R. E. 1939. *Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. Transactions American Geophysical Union, Washington.*

KAYSER, R. H. B.; COLLISCHONN, W. 2013. Integrando sistema de suporte à decisão genérico para gerenciamento de recursos hídricos a um SIG de código aberto. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH.

KICH, E de M. 2014. Nova proposta metodológica de obtenção do parâmetro CN médio a partir de imagens de satélite. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental – UFRGS. Porto Alegre.

McCARTHY, C. T. 1939. *The Unit Hydrograph and Flood Routing*. Providence: U. S. Corps of Engineers.

PERRY, G. 1999. Aprenda em 21 dias Visual Basic 6. Elsevier Editora. Rio de Janeiro.

PULS, L. G. 1928. Flood Regulation of the Tennessee River. House Document nº 185, 70<sup>th</sup> Congress, 1<sup>st</sup> Session. Washington, D. C.

SILVEIRA, A. L. L. da. 2005. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 10 n. 1.

STAUGAARD Jr., A. C. 2002. Structured and object-oriented problem solving using C++. Upper Saddle River Prentice Hall, 3<sup>a</sup> ed. New Jersey, United States.

TUCCI, C. E. M. 1981. Modelo IPH II de simulação precipitação vazão na bacia: alguns resultados. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Fortaleza. Anais: ABRH, São Paulo. Vol. 2, p. 83-103.

TUCCI, C. E. M. 1993. Simulação distribuída com IPH II : nova versão. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Gramado. Anais: ABRH, IPH, Porto Alegre. Vol.3, p.495-504.

TUCCI, E. M. (Coordenador). 2004. IPHS1 para Windows® - Manual de Fundamentos, Versão Preliminar. UFRGS/UFPEL/FURG, Brasil.

TUCCI, E. M. T. 2005. Modelos Hidrológicos. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. 2<sup>a</sup> edição. Porto Alegre, Editora da UFRGS.

TUCCI, E. M. (Organizador) 2007. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre. Editora da UFRGS/ABRH.

TOMAZ, P. 2013. Curso de Manejo de águas pluviais – Capítulo2: Método Racional.

## 8 ANEXOS

**Tabela com valores de CN para bacias rurais (TUCCI, 2007)**

Uso do Solo	Superfície	Tipo de solo			
		A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de níveis	67	77	83	87
	Terraceamento em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de níveis	62	74	82	85
	Terraceamento em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de níveis	60	72	81	84
	Terraceamento em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
Pastagens em curvas de nível	Boas	39	61	74	80
	Pobres	47	67	81	88
	Normais	25	59	75	83
	Boas	6	35	70	79
Campos permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normais	36	60	73	79
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras	Normais	56	75	86	91
Estradas de terra	Ruim	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Floresta	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, de alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

**Tipos de solo da tabela (TUCCI, 2007)**

Solo A	Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte.
Solo B	Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundos que o tipo A e com permeabilidade superior à média.
Solo C	Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo.
Solo D	Solos contendo argilas expansivas, pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.