META 2 – Estudo Hidrológico

Relatório Técnico – Parte 1

Modelagem Hidrológica

HIDRO LAGES

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA ECONÔMICA – EVTA

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE LAGES

Defesa Civil

Universidade do Estado de Santa Catarina

Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV

COORDENAÇÃO GERAL
Sílvio Luís Rafaeli Neto - ART 6772660-6

SECRETARIA
Jussara Ribeiro dos Reis

TEXTO

Mariane Souza Melo de Liz

PROGRAMAÇÃO VISUAL e MAPAS
Sílvio Luís Rafaeli Neto

EQUIPE TÉCNICA

RESPONSÁVEIS TÉCNICOS
Mariane Souza Melo de Liz – ART 6814760-7
Sílvio Luís Rafaeli Neto - ART 6772660-6

Apoio
Dayane Macedo Medeiros

SUMÁRIO

1 Apresentação 6
1.1 Modelo hidrológico como modelo de um sistema 6
1.2 Modelos hidrológicos 7
1.3 O processo de simulação e a escolha do modelo hidrológico 9
1.4 Parâmetros de um modelo 10
1.5 Aplicativos para modelagem hidrológica 11
2 O modelo HEC-HMS 12
3 Preparação do modelo conceitual para o projeto Hidro-Lages no HEC-GeoHMS 13
4 Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha 21
5 Parâmetros e critérios para a modelagem hidrológica no projeto Hidro-Lages 28
5.1 A interceptação pela vegetação 28
5.2 O armazenamento nas depressões do terreno e o escoamento superficial direto 31
5.3 O escoamento de base 38
5.4 A propagação da onda de cheia nos canais 41
6 Análise de sensibilidade e calibração do modelo 44
6.1 Funções-objetivo na qualidade dos ajustes 49
7 Referências 51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos hidrológicos relacionados com a geração de vazão no exutório de uma bacia hidrográfica. 7
Figura 2 – Representação das subdivisões de uma bacia hidrográfica segundo o modelo conceitual baseado em discretização de unidades hidrológicas. 14
Figura 3 – Fluxograma metodológico para a obtenção do Modelo Conceitual do projeto a partir da extensão HEC-GeoHMS 16
Figura 4 - Unidades hidrológicas (UHs) da Concepção 3 utilizada para a modelagem hidrológica do sistema hidrológico da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha..... 20
Figura 5 – Diagrama unifilar de escoamento dos trechos de canal e das unidades hidrológicas que contribuem para o modelo hidrológico da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha..... 23
Figura 6 - Modelo conceitual para a modelagem hidrológica do projeto Hidro-Lages no HEC-HMS..... 24
Figura 7 - Detalhe do modelo conceitual nas bacias urbanas dos rios Ponte Grande e Carahá..... 25
Figura 8 – Fluxograma geral das etapas da modelagem hidrológica com o aplicativo HEC-HMS 4.3..... 28
Figura 9 – Hidrograma típico de uma seção de controle..... 33
Figura 10 – Hidrograma Unitário SCS adimensional. 37
Figura 11 – Separação do escoamento de base do escoamento superficial direto. 39
Figura 12 – Hidrograma da vazão total e do escoamento de base para a UH Presidente Vargas, localizada no núcleo urbano de Lages. 41
Figura 13 – Armazenamento aproximado dos volumes em um canal de acordo com o método de Muskingum..... 43
Figura 14 – Modelagem da forma dos sub-trechos de canal que realizam a interligação entre as UH do modelo hidrológico. 44
Figura 15 – Dados de entrada no modelo hidrológico utilizando o método de propagação de onda cheia de Muskingum-Cunge..... 46
Figura 16 – Procedimento de otimização das variáveis de entrada do modelo hidrológico..... 47
Figura 17 – Gráfico de dispersão do valores simulados e observados para o evento de inundação ocorrido em 2005. 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição das classes de declividade do relevo segundo a porcentagem de declividade. 17
Tabela 2 – Distribuição das classes de declividade segundo a classificação da Embrapa para as unidades hidrológicas da bacia hidrográfica Estação Ponte Velha. 18
Tabela 3 – Valores de CN para as unidades hidrológicas urbanas e rurais segundo os grupos hidrológicos de solo e o mapa de uso e ocupação da terra. 19
Tabela 4 – Descrição dos elementos hidrológicos conceituais do modelo hidrológico HEC-HMS. 22
Tabela 5 – Armazenamento de água pela interceptação da precipitação para diferentes tipos de vegetação superficial. 29
Tabela 6 – Valores de armazenamento máximo no dossel (mm) para as UHs da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha. 31
Tabela 7 – Armazenamento de água nas depressões da superfície do solo para diferentes declividades e cobertura do terreno. 32
Tabela 8 – Valores de armazenamento máximo nas depressões da superfície do terreno (mm) para as UHs da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha 32
Tabela 9 - Os valores de CN para as UHs da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha. 35
Tabela 10 – Valores típicos da constante de recessão (k) de acordo com a vazão antecedente da bacia. 40
Tabela 11 – Valores da Constante de Recessão (k) para as UHs da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha. 40
Tabela 12 – Critérios de avaliação de desempenho da função-objetivo NSE. 49

1 Apresentação

Por Mariane Souza Melo de Liz

A realização de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas provém da necessidade de compreensão sobre o ciclo hidrológico, do balanço hídrico entre os compartimentos ambientais, dos fluxos e movimentos de água e energia e dos impactos que a modificação da superfície terrestre pode provocar nestes subsistemas (RENNÓ e SOARES, 2000). A abordagem dos modelos hidrológicos utiliza-se de uma visão holística, ao adotar a bacia hidrográfica como unidade hidrológica de estudos, além de avaliar esta unidade como um sistema que apresenta respostas intimamente relacionadas com suas características morfológicas (NETO, 2000).

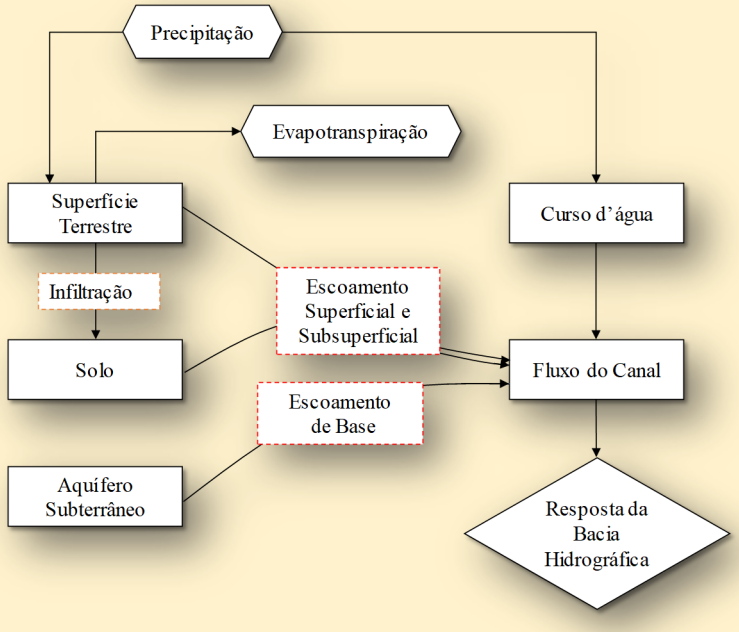
O objetivo da Parte 1 do Relatório Técnico da Meta 2: Estudo Hidrológico é apresentar a modelagem hidrológica como meio de análise do sistema hidrológico da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha. A modelagem hidrológica é descrita como uma ferramenta de representação conceitual e formal do sistema, pela qual se procurou compreender os processos hidrológicos relacionados com o evento hidrológico crítico de 2005. As análises das chuvas, das taxas de escoamentos, volumes e tempos de recorrências são apresentadas na Parte 2.

1.1 Modelo hidrológico como modelo de um sistema

O modelo de um sistema geográfico é representado por estruturas que procuram capturar comportamentos relevantes do fluxo de material ou energia entre os componentes morfológicos. Um modelo hidrológico é uma representação matemática simplificada dos fluxos e da dinâmica da água sobre as superfícies e subsuperfícies da crosta terrestre. São simplificações matemáticas dos processos de armazenamentos e transferências do ciclo hidrológico e buscam reproduzir o comportamento médio do sistema modelado considerando as propriedades dos seus componentes.

Os processos hidrológicos são complexos e envolvem grande quantidade de variáveis que assumem estados ao longo do tempo e do espaço. Na perspectiva do ciclo hidrológico, a água está armazenada em reservatórios sejam eles permanentes, como o solo, ou temporários, como a atmosfera. Estes reservatórios apresentam variações nos volumes armazenados ao longo do tempo, a depender de fatores ambientais. Desta forma, o balanço hídrico na unidade de resposta hidrológica (componente morfológico do subsistema) pode ser contabilizado através da análise de entradas e de saídas deste subsistema (Figura 1).

Figura 1 – Processos hidrológicos relacionados com a geração de vazão no exutório de uma bacia hidrográfica.



Fonte: adaptado de USACE (2000).

1.2 Modelos hidrológicos

Modelos hidrológicos são representações formais de um sistema hidrológico. O sistema hidrológico normalmente adotado é a bacia hidrográfica, na qual ocorrem os processos de armazenamentos e transferências hídricas.

Um modelo hidrológico é um tipo de modelo. O modelo de um sistema pode ser útil para (POOCH e WALL, 1993; SIMON, 1960):

a) definir um sistema ou problema;
b) determinar os elementos de um sistema;
c) sintetizar e avaliar alternativas de solução do problema;
d) prever comportamentos e auxiliar planejamentos de ações futuras;
e) avaliar as magnitudes das variáveis do sistema e realizar prescrições que tragam efeitos desejados sobre as saídas do sistema;
f) prover documentação;
g) prover treinamento;
h) realizar controle.

Estas funções de análise estão no escopo do projeto Hidro-Lages, na medida em que os problemas das inundações, alagamentos e enxurradas serão avaliados mediante um modelo de representação do sistema geográfico, onde esses problemas se manifestam.

O uso de modelos hidrológicos no nível de bacias hidrográficas está estabelecido sobre bases sólidas na literatura. Discussão sobre a classificação dos modelos hidrológicos podem ser encontradas em (MAIDMENT, 1993; VERTESSY, HATTON, *et al.*, 1993; TUCCI, 2005).

Os modelos hidrológicos são classificados de acordo com as variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos);

com o tipo de relação estabelecido entre estas variáveis (empíricos ou conceituais); com a forma como os dados são representados espacialmente (discretos ou contínuos); se existem relações espaciais ou não (distribuídos ou pontuais); e se existe dependência temporal nos dados (estático ou dinâmico) (RENNÓ e SOARES, 2000).

Diante da abordagem probabilística, modelos podem ser estocásticos ou determinísticos. Os modelos estocásticos são aqueles que consideram a ocorrência de probabilidades em sua formulação; já os modelos determinísticos ignoram este tipo de variável na sua constituição.

Quando se tratam das equações de base utilizadas nos modelos, eles podem ser classificados em empíricos ou conceituais. Os modelos empíricos são constituídos de equações que representam relações baseadas em observações. São modelos simples e úteis para os hidrólogos em seu dia a dia. No entanto, são menos robustos pelo fato de que foram desenvolvidos para regiões com características específicas. Os modelos conceituais, por outro lado, são baseados em dinâmicas complexas, pois procuram descrever todos os processos que envolvem algum fenômeno natural (MING, 2007).

Quanto à continuidade, os modelos podem ser contínuos – quando os fenômenos ocorrem sem interrupções durante todo o intervalo de tempo – ou podem ser discretos, quando são intermitentes. Mesmo que a maioria dos processos naturais ocorra de forma contínua, os modelos geralmente trabalham com dados discretos, em passos de tempo pré-determinados para que as equações possam ser calculadas. As equações são calculadas para intervalos iguais de tempo (tratados pelos modelos como ¨passos de tempo¨ ou *time steps*).

Os modelos pontuais ou concentrados são aqueles onde todas as variáveis não levam em conta a distribuição de valores no espaço. Assim, apenas um valor médio é utilizado para descrever e representar todo o comportamento dentro da unidade espacial que o modelo adota. No caso do projeto Hidro-Lages, a unidade espacial é a Unidade Hidrológica ou UH. Nestas unidades, homogeneidade é o critério para a sua definição. Nos modelos distribuídos, por outro lado, as variáveis de estados do sistema se distribuem espacialmente. O modelo de dados espaciais comumente utilizado é a grade ou matriz e seguem princípios topológicos (Rennó & Soares, 2000), ou seja, relações de adjacências, conectividades, entre outras. Essas relações são definidas por meio de algoritmos que se baseiam em alturas das células no relevo e determinam a topologia espacial pelo princípio físico de deslocamento da partícula de água na superfície.

Os modelos ainda podem ser estáticos, quando o conjunto de resultados é produzido em apenas um passo de tempo da simulação, ou dinâmicos[1], quando procuram definir o estado do sistema por meio de processos iterativos, nos quais os resultados de uma etapa de simulação são utilizados como dados de entrada para uma nova

[1] Alguns modelos são denominados de *hidrodinâmicos* devido ao fato de que trabalham com dados distribuídos espacialmente em grades, onde os cálculos de propagação da onda de cheia são realizados de forma iterativa, até a obtenção do resultado mais adequado.

rodada de simulação. Assim, um novo resultado é obtido a cada iteração, até a convergência segundo limites estabelecidos pelo analista.

1.3 O processo de simulação e a escolha do modelo hidrológico

Os modelos hidrológicos foram idealizados conceitual e matematicamente há muitas décadas. No entanto, somente com o desenvolvimento tecnológico houve a possibilidade de implementação destes modelos em sistemas computacionais, que realizam cálculos numéricos impossíveis de se alcançar manualmente.

A aplicação prática dos modelos hidrológicos ocorre por meio de um processo denominado de ¨simulação¨. Esta etapa requer a inserção de dados de entrada e parâmetros das unidades de resposta hidrológica, para a solução de sistemas de equações, que demandam a utilização de ferramentas computacionais para o processamento da modelagem (CANHOLI, 2014). Estes conjuntos de equações podem ser entendidos como uma coleção de hipóteses, que aproximam as entradas fornecidas às saídas do sistema. Assim, um mesmo processo hidrológico pode ser representado de diferentes maneiras, algumas mais apropriadas do que outras, a depender do modelo escolhido.

A própria representação do modelo hidrológico é uma aproximação do comportamento real de uma bacia hidrográfica, mas ainda assim, é simplificado diante da complexidade dos fenômenos naturais. Não se pode dizer que existe um modelo único que seja o melhor, apenas que um modelo que representa de forma mais adequada a determinado fenômeno.

A escolha do modelo hidrológico mais adequado para representação dos processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica depende, em grande medida, do conjunto de dados disponíveis para a aplicação do modelo. Este é um aspecto relevante que pode limitar a escolha do melhor modelo. A escolha do modelo para as simulações desejadas deve também levar em consideração diversos aspectos.

Primeiramente, deve-se considerar a utilização de aplicativos que possuam uma ampla gama de modelos matemáticos e equações, pois permitem maior flexibilidade frente à diferentes situações simuladas. Neste caso, podem ser mencionados modelos que apresentem diferentes métodos de cálculo para a precipitação efetiva, ou que permitam simulações em escoamento unidimensional ou bidimensional para os perfis de velocidades, por exemplo.

Um segundo aspecto trata das funcionalidades deste aplicativo. É necessário que suas configurações permitam a computação de elementos detalhados com o mínimo de esforço computacional. Uma boa caracterização do sistema hidrológico será obtida quanto mais modulado for o aplicativo e mais detalhadas as descrições dos parâmetros de entrada. Além disto, é obrigatória a presença de um módulo especializado na calibração de parâmetros, para que os ajustes do modelo sejam aproximados aos dados observados. O modelo é considerado calibrado quando consegue reproduzir as saídas produzidas pelo sistema hidrológico, sendo estas

observadas a campo. Uma vez calibrado, o modelo é considerado uma representação da realidade e pode, a partir daí, servir como instrumento de análise, projeto e tomada de decisão.

1.4 Parâmetros de um modelo

Parâmetro de um modelo é uma constante usualmente arbitrária (i.e. pode ser alterada) e expressa uma relação particular entre entrada e saída (VEMURI, 1978). Alguns parâmetros podem ter significados físicos como, p. e., capacidade máxima de armazenamento da água no solo, velocidade máxima da água em um canal, rugosidade de um canal. Como tais medidas são difíceis de se obter na prática, costuma-se arbitrar um valor inicial, com base em conhecimento empírico ou científico, e depois alterar por meio de processo de otimização.

A alteração de um parâmetro de modelo pode ser induzida por (NETO, 2000):

a) Alteração do estado de um componente de sistema morfológico: em sistemas geográficos em geral a alteração de um elemento físico produz efeitos sobre o comportamento do fluxo de material ou energia. Por exemplo, a alteração da capacidade de infiltração de parcelas de solo de uma bacia hidrográfica pode acarretar efeitos significativos sobre seu comportamento hidrológico, inclusive agravando o problema das inundações.
b) Introdução de novos valores observados das variáveis independentes: o valor de um parâmetro é determinado pelo processo de calibração do modelo, o que ocorre durante a etapa de desenvolvimento. A calibração visa atingir uma determinada configuração numérica para um grupo de parâmetros a fim de que o par observado entrada-saída de um sistema seja reproduzido pelo modelo. O valor do parâmetro será tanto melhor quanto melhor for o resultado apresentado pelo modelo. Numa situação ideal o modelo é isomórfico, ou seja, representa fielmente o comportamento do sistema real.
c) Desejo em explorar o modelo: cientistas e interessados no problema podem querer explorar o mundo real num ambiente de representação. Isto pode incluir processos de tentativa-erro (determinar o impacto de alterações sobre variáveis), "o que acontece se..." (realizar predições sobre as variáveis de saída com base em suposições sobre as variáveis de entrada e parâmetros) e recorrência a metas (determinar valor de uma variável de entrada de modo que o sistema produza saída desejada).

Assim, o processo de modelagem hidrológica realizado na bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha, dividiu o espaço geográfico em unidades espaciais menores, com o objetivo de distribuir as variáveis de estado por essas unidades, bem como os parâmetros. O objetivo desta abordagem foi procurar tornar o modelo o mais isomórfico possível a fim de que se pudesse explorar o modelo conforme mencionado acima.

1.5 Aplicativos para modelagem hidrológica

Os aplicativos disponíveis para a modelagem hidrológica têm se aperfeiçoado ao longo do tempo, buscando apresentar uma interface amigável, de fácil utilização para o usuário, com janelas e ferramentas de uso intuitivo. Além disto, as janelas de processamento, com o status dos processos e compilação dos erros devem ser diretas e precisas, auxiliando na correção dos problemas da simulação.

A visualização e apresentação dos resultados de um modelo hidrológico deve ser detalhada e, ao mesmo tempo, de fácil compreensão dos dados sintetizados na forma de gráficos e tabelas. Muitos aplicativos atuais possuem acoplamento dos resultados de simulações a Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que permitem a visualização e manipulação de informações georreferenciadas. Outros aplicativos, têm desenvolvido plataformas SIG internas, que permitem a realização de processamentos inteiramente dentro de sua plataforma. Tais sistemas são denominados de Sistemas de Apoio à Decisão Espacial (SADE) (NETO, 2000).

Outros aspectos relevantes, porém, menos enfatizados, são a necessidade de o aplicativo possuir documentação detalhada, ou seja, manuais disponíveis e atualizados periodicamente. A própria manutenção dos aplicativos, para a redução de erros (*bugs*) deve ser realizada frequentemente, para evitar sua obsolescência. Além disto, os programas de modelagem devem ser adaptados ao funcionamento em qualquer sistema operacional disponível em computadores, pois, aplicativos restritos inviabilizam seu uso por instituições e gestores públicos (CANHOLI, 2014).

Existem inúmeros aplicativos de modelagem hidrológica disponíveis atualmente, sendo mencionados por exemplo: *Agricultural Non-Point Source Pollution Model* (AGNPS); Cascade Two-Dimensions (CASC2D); *Hydrologic Modeling System* (HMS); *Kinematic Runoff and Erosion Model* (KINEROS); *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT); *Topography Based Hydrological Model* (TOPMODEL); *Water Erosion Prediction Project* (WEEP), entre outros. Todas estas plataformas de modelagem hidrológica variam em disponibilidade de aplicação e também em termos de sistemas de equações matemáticas, algumas mais simples e outras mais complexas.

De maneira geral, as etapas de modelagem hidrológica disponíveis na maioria dos aplicativos, podem ser relacionadas da seguinte forma (CANHOLI, 2014):

a) Escolha do modelo e determinação dos parâmetros e variáveis de entrada necessários à modelagem e disponíveis;
b) Escolha do aplicativo e preparação/inserção dos dados de entrada (o acoplamento com outros aplicativos de armazenamento de dados compatíveis é uma opção, pois evita perda de informações por meio da transferência dos dados ou por conversão);
c) Simulação;

d) Calibração dos parâmetros do modelo;

e) Interpretação dos resultados.

Os procedimentos de verificação da adequabilidade de um modelo hidrológico a uma bacia hidrográfica ou sistema hidrológico, são resumidos pelos itens (d) e (e). A análise de sensibilidade dos parâmetros inseridos no modelo é uma etapa associada à calibração, e informa quais são os parâmetros mais sensíveis aos processos hidrológicos considerados. A calibração e validação da série histórica disponível permite verificar o sucesso no ajustamento do modelo ao evento observado. E a verificação da eficiência dos resultados, através de sua interpretação, é medida através de aplicação de análises estatísticas.

Outra etapa adicional, e também muito relevante em processos de modelagem atuais, é a verificação das incertezas associadas ao modelo. É amplamente sabido que os modelos hidrológicos raramente representam de forma perfeita as respostas hidrológicas de uma bacia hidrográfica. Existem incertezas oriundas de modelos meteorológicos inadequados, de erros na coleta de dados a campo, incongruências na forma de representar os processos do modelo e mesmo erros na identificação dos dados de entrada mais adequados (USACE, 2018).

As incertezas geralmente estão associadas aos parâmetros do modelo hidrológico mais sensíveis, ou seja, pequenas alterações nas configurações de modelagem produzem alterações expressivas nos valores desses parâmetros. Por esta razão, a sua avaliação é componente chave para determinar a confiabilidade do modelo utilizado. Principalmente, porque os modelos buscam compensar erros em parâmetros, ao alterar valores corretos em outras variáveis. Análises de incerteza têm sido incluídas na avaliação de risco de representatividade de cenários.

2 O modelo HEC-HMS

De maneira geral, a plataforma HEC possui diferentes módulos que permitem realizar simulações para diversas finalidades em termos de gerenciamento de recursos hídricos. Neste estudo, optou-se pelo uso da plataforma de modelagem hidrológica HEC-HMS. Para tanto, foram consideradas as possibilidades de utilização de um aplicativo de modelagem hidrológica, em termos de integração com SIG, ampla documentação disponível, atualização e correção de problemas constante, aplicabilidade em diversos sistemas operacionais, e gratuidade de uso.

O aplicativo HEC-HMS é um dos modelos disponíveis dentre a família HEC. O exército americano possui um corpo de engenheiros inteiramente dedicado ao desenvolvimento de uma série de programas que compõem ferramentas de análise de vários aspectos da engenharia hidrológica e hidráulica, e de onde origina-se seu nome, em inglês: Hydrologic Engineering Center, e em português: Centro de Engenharia Hidrológica. Já a sigla HMS é oriunda do termo Hydrologic Modeling System, ou Sistema de Modelagem Hidrológica.

Esse módulo é responsável pela simulação do processo de transformação chuva-vazão em sistemas de bacias hidrográficas, utilizando-se de metodologias consagradas e muito tradicionais dentro da comunidade científica.

O HEC-HMS é um aplicativo compatível com os sistemas Windows, Solaris e Linux, podendo ser utilizado por qualquer agência de estudos ambientais e climatológicos do governo. Dispõe de ampla documentação e manuais para os usuários, no entanto, está formulado completamente em inglês. Ele opera por meio da inserção de dados tabulares e por interface gráfica, que compreende dados matriciais, sendo compatível com o Excel, com aplicativos de sua própria família, e com sistemas de informações geográficas (SIG).

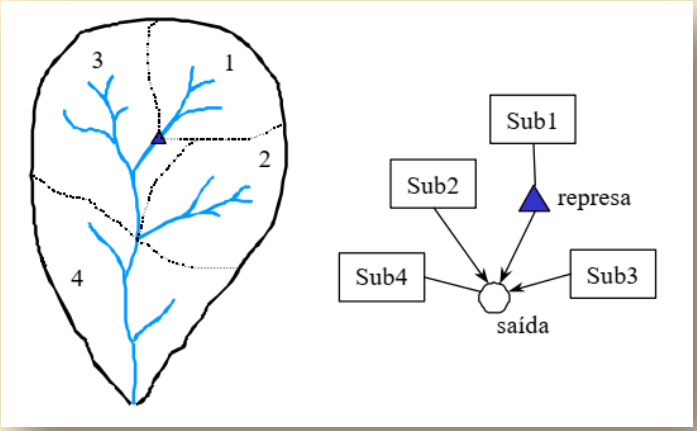
A família de aplicativos disponibilizada pela organização HEC é livre e tem seu uso recomendado pelo órgão ambiental americano Federal Emergency Management Agency (FEMA) para a obtenção de dados que incluem análise hidrológica, hidrodinâmica, transporte de sedimentos, análises de perigo, gestão de eventos em tempo real, entre outros (MACHADO, 2017). Portanto, a utilização do modelo HEC-HMS está embasada em estudos e normativas que seguem padrões internacionais de excelência.

3 Preparação do modelo conceitual para o projeto Hidro-Lages no HEC-GeoHMS

O documento "**Produto 1 – Estudos e Concepções**" introduziu as concepções hidrológicas que deram origem aos estudos de modelagem originais com todas as unidades de resposta hidrológica concebidas em trabalhos anteriores. Estas concepções hidrológicas são aquilo que se denomina de Modelo Conceitual, ou seja, a discretização das unidades hidrológicas é realizada conceitualmente pelos analistas antes mesmo da sua efetiva modelagem e simulação dentro dos aplicativos.

A preparação do Modelo Conceitual é etapa primordial utilizada na idealização dos locais mais adequados para a delimitação das unidades hidrológicas, segundo a necessidade de alocação dos pontos de controle de vazões em trechos de interesse e também em locais onde existe a confluência de tributários nos canais principais (Figura 2).

Figura 2 – Representação das subdivisões de uma bacia hidrográfica segundo o modelo conceitual baseado em discretização de unidades hidrológicas.



Fonte: Adaptado de Maidment (1993).

O particionamento das unidades hidrológicas é baseado no Modelo Digital de Terreno (MDT), a partir das linhas de fluxo do escoamento. Todos os processos de determinação de parâmetros baseados na topografia do terreno são automatizados, através da utilização da extensão computacional HEC-GeoHMS, instalada junto ao sistema de informações geográficas ArcGIS 10.5. Esta ferramenta foi desenvolvida pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE), para a preparação de dados e obtenção de informações e parâmetros morfológicos previamente às simulações no Modelo Hidrológico.

As etapas de pré-processamento dos dados com o auxílio do HEC-GeoHMS estão resumidas na Figura 3 através de um fluxograma metodológico estabelecido para este estudo. Durante o decorrer do texto serão apresentados os nomes de muitas ferramentas e modelos de cálculo em inglês, para evitar que a tradução promova a perda de sentido que os vocábulos originais carregam.

A primeira etapa (Terrain Pre-processing) caracteriza-se pelo pré-processamento do MDT; pelo preenchimento das falhas e depressões artificiais contidas nas células matriciais; determinação das direções preferenciais de fluxo do escoamento; segmentação dos canais de escoamento no fundo dos talvegues e seu ordenamento; determinação da área de contribuição mínima para as unidades hidrológicas (optou-se por utilizar 10 km²); e por fim, a separação das múltiplas UHs geradas automaticamente.

Esta é uma das etapas mais extensas, pois está baseada no processamento de grandes quantidades de dados matriciais. O MDT utilizado é oriundo do aerolevantamento realizado pelo Estado de Santa Catarina entre o período de 2010 a 2012, e possui alta resolução espacial. Devido à alta qualidade, os arquivos de dados são pesados e promovem esforço computacional em processamentos. No entanto, a alta qualidade é fator imprescindível para que os resultados da modelagem hidrológica sejam muito próximos dos dados observados.

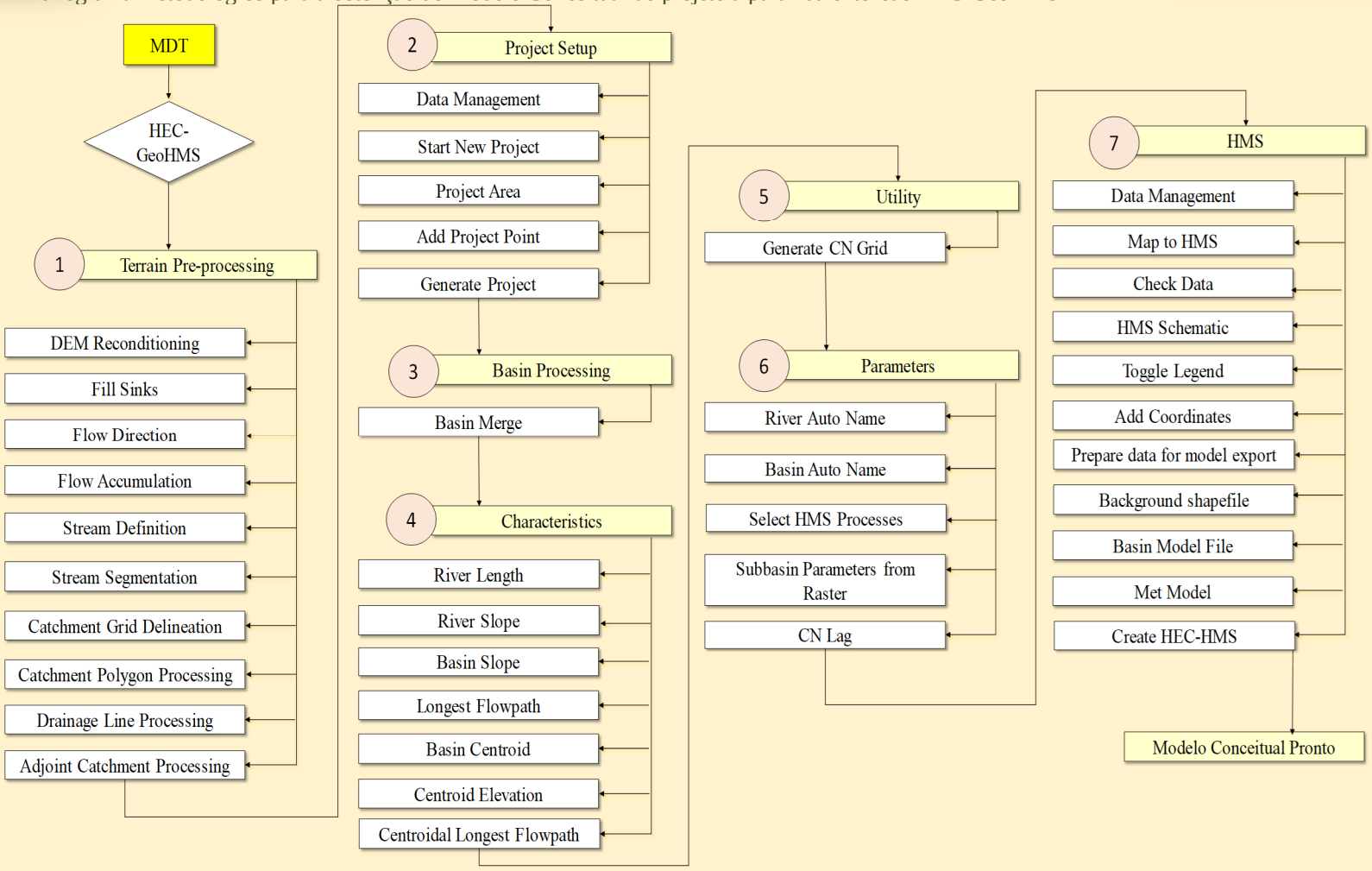
A segunda etapa do pré-processamento é a construção da base de dados associada ao projeto que será exportado ao final (Project Setup). A criação do projeto define o ponto exato do

exutório da área de estudos, e a partir desta definição foram calculados todos os parâmetros gerais das UH. O ponto do exutório foi posicionado sobre a localização da ponte que atravessa o rio Caveiras, na antiga BR-2, em Lages, pois é o local onde a estação Ponte Velha fora implantada na década de 2000. Este também é o local onde existem dados de vazão observados para os eventos que foram simulados, representando um ponto crucial neste estudo.

A terceira etapa também está relacionada com a delimitação das áreas de cada uma das UH, pois através da ferramenta de fusão destas áreas em unidades que apresentassem homogeneidade de características, os parâmetros puderam ser espacializados.

Além disso, diante da necessidade de definição de pontos de controle para a alocação das junções do modelo, foi realizado o particionamento de algumas unidades hidrológicas. Nestes casos, o modelo realizou a separação das sub-bacias em unidades menores que 10km² de área de contribuição, principalmente, em pontos onde foram idealizadas as estruturas hidráulicas de contenção, controle e mitigação de cheias.

Figura 3 – Fluxograma metodológico para a obtenção do Modelo Conceitual do projeto a partir da extensão HEC-GeoHMS



Fonte: A autora.

Pode-se dizer, que este é um dos pontos cruciais para a modelagem hidrológica, no entanto, é construído e planejado antes da implementação das simulações. A partir da etapa 3, de processamento das sub-bacias (Basin Processing), o modelo conceitual que comporta a Concepção Hidrológica 3 (apresentada no "**Produto 1- Estudos e Concepções**") está espacialmente delimitado, faltando-lhe apenas a obtenção dos parâmetros numéricos exigidos pelo modelo hidrológico.

A quarta etapa de pré-processamento dos dados em ambiente SIG (Characteristics), resultou na obtenção de diversos parâmetros de entrada obrigatórios no modelo hidrológico. Muitos destes, estão baseados nas características fisiográficas das unidades de resposta hidrológica e são adquiridos através do cálculo de equações que consideram o relevo da bacia, sua rede de drenagem e o fluxo de escoamento obtido no processamento dos rasters.

Nesta etapa foi obtido de forma automatizada o valor do Maior Trecho de Canal (Longest Flowpath), que é extremamente importante para a definição do tempo de concentração das unidades de resposta hidrológica e de diversos outros parâmetros obtidos a partir destes.

Hidrologicamente, este parâmetro indica o maior trecho que a água viaja desde a região do divisor de águas, até o exutório da bacia. Computacionalmente, o aplicativo determina esta distância por meio do fluxo nos pixels, e pela soma de distâncias incrementais a cada pixel contido nas regiões de talvegues mais remotos. Este tipo de informação é fundamental para cálculos de hidrogramas e para a aplicação de métodos que utilizam informações fisiográficas das unidades hidrológica.

A declividade média das UH e dos canais de drenagem também foi determinada a partir da geração do mapa de declividades em porcentagem da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha. Esta região caracteriza-se pela presença de relevo suave-ondulado a forte ondulado, segundo a classificação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1979) (Tabela 1).

Tabela 1 – Distribuição das classes de declividade do relevo segundo a porcentagem de declividade.

Declividade (%)	Relevo
0 – 3	Plano
3 – 8	Suave- Ondulado
8 – 20	Ondulado
20 – 45	Forte-Ondulado
45 – 75	Montanhoso
> 75	Forte-Montanhoso

Fonte: adaptado de Embrapa (1979).

No módulo HEC-GeoHMS os valores de declividades estão distribuídos espacialmente, no entanto, há simplificação dos valores para obtenção da média de cada UH (Tabela 2).

Tabela 2 – Distribuição das classes de declividade segundo a classificação da Embrapa para as unidades hidrológicas da bacia hidrográfica Estação Ponte Velha.

Unidade Hidrológica	Declividade média (%)	Classe do Relevo
Aeroporto	10,75	Ondulado
Batalhão	6,74	Suave-ondulado
Boqueirão	16,00	Ondulado
Caveiras Montante 2	21,29	Forte-ondulado
Chácaras	15,09	Ondulado
Coração	15,83	Ondulado
Cotovelo	15,58	Ondulado
Duque de Caxias	6,37	Suave-ondulado
Entre Rios	17,63	Ondulado
Ferrovia	10,20	Ondulado
Fórum Nereu Ramos	5,72	Suave-ondulado
Passo Fundo	15,82	Ondulado
Pedras Brancas	16,35	Ondulado
Ponte Velha	18,18	Ondulado
Presidente Vargas	8,17	Ondulado
Reservatório	14,39	Ondulado
Rib. Do Cachoeirão	18,98	Ondulado
Ribeirão da Cutia	18,48	Ondulado
Ribeirão Santana	18,28	Ondulado
Rio do Guará	17,46	Ondulado
Rodovia BR-282	9,09	Ondulado
SC LA SR 03 CPRM	9,46	Ondulado
Tributo	11,47	Ondulado
Túnel	12,11	Ondulado
UDESC Painel	18,45	Ondulado

Na quinta etapa de pré-processamento dos dados, foi obtido o mapa de CN (*curve number*). Este mapa é imprescindível para a utilização do método de cálculo da chuva efetivamente precipitada na bacia, e também para a conversão da precipitação em vazão. Estes métodos, seus parâmetros principais e a motivação que conduziu à sua escolha, serão abordados mais à frente, nos itens subsequentes. No entanto, o detalhamento destas etapas demonstra o quanto a construção do Modelo Conceitual e seus pré-processamentos devem ser idealizados com cautela, antes de qualquer procedimento. A realização das etapas de estudos anteriores – descrita em maiores detalhes no **Produto 1** –, também se apresentou fundamental para esta etapa de planejamento.

O mapa de valores para o CN (formato grid/raster) em toda a bacia hidrográfica foi gerado a partir de processamentos dos dados cartográficos da superfície – mapas de uso e ocupação da terra e mapa pedológico –, e pelo cruzamento de planilhas obtidas na literatura, que apresentam os valores típicos para a capacidade de interceptação em diferentes classes de uso da terra e para os grupos hidrológicos associados aos quatro tipos de solos descritos a seguir.

Na região de estudo, os solos existentes são os Cambissolos Háplico e Húmico e os Nitossolos Háplico e Neossolo Litólico. Segundo o Altas Geográfico de Santa Catarina (2016), os Cambissolos são solos com baixo grau de desenvolvimento pedogenético, e segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SBSC), possuem horizonte B incipiente, localizados em talvegues e áreas suscetíveis a inundações. A diferenciação entre os

tipos de Cambissolo ocorre pelo fato de que os Cambissolos Háplicos possuem horizonte A moderado ou proeminente, enquanto o Cambissolo Húmico possui o horizonte A superficial escuro e espesso, em locais de maior altitude.

O Neossolo se caracteriza pelo pequeno grau de evolução pedogenética, sem qualquer tipo de horizonte B. Os Neossolos Litólicos são mais rasos, com espessura de 10 a 50 cm, seus horizontes A assentam-se diretamente sobre a rocha. São encontrados em locais íngremes e escarpas, e apresentam baixa capacidade de retenção de água. O Nitossolo Háplico caracteriza-se pela textura argilosa ou muito argilosa, sendo profundos, bem drenados e de coloração variando entre vermelha a brunada (SANTA CATARINA, 2016).

Uma planilha de consolidação dos valores de CN adotados durante o pré-processamento é apresentada na Tabela 3. Os valores constantes nesta tabela foram adaptados de alguns autores pesquisados (SARTORI, GENOVEZ e LOMBARDI NETO, 2005; TUCCI, 2009; COLLISCHONN e DORNELLES, 2013),.

Apesar dos processamentos produzirem um mapa do CN em formato matricial, o que poderia contribuir para o maior detalhamento dos parâmetros de entrada no modelo hidrológico, optou-se por utilizar um valor de CN médio para cada uma das UH (Figura 4), para fins de automatização das etapas posteriores. Isto corrobora o que fato de que o modelo HEC-HMS é denominado de semi-distribuído, pois cabe ao analista dos dados verificar a necessidade de se utilizar dados em formato matricial ou pontual para as simulações, conforme a necessidade ou disponibilidade desta informação.

A sexta etapa do pré-processamento é fundamental, apesar de breve. Neste momento, o aplicativo realiza a extração de todas as informações disponíveis em mapas vetoriais e matriciais no banco de dados associado ao projeto, e realiza um processo de preenchimento das planilhas associadas aos mapas.

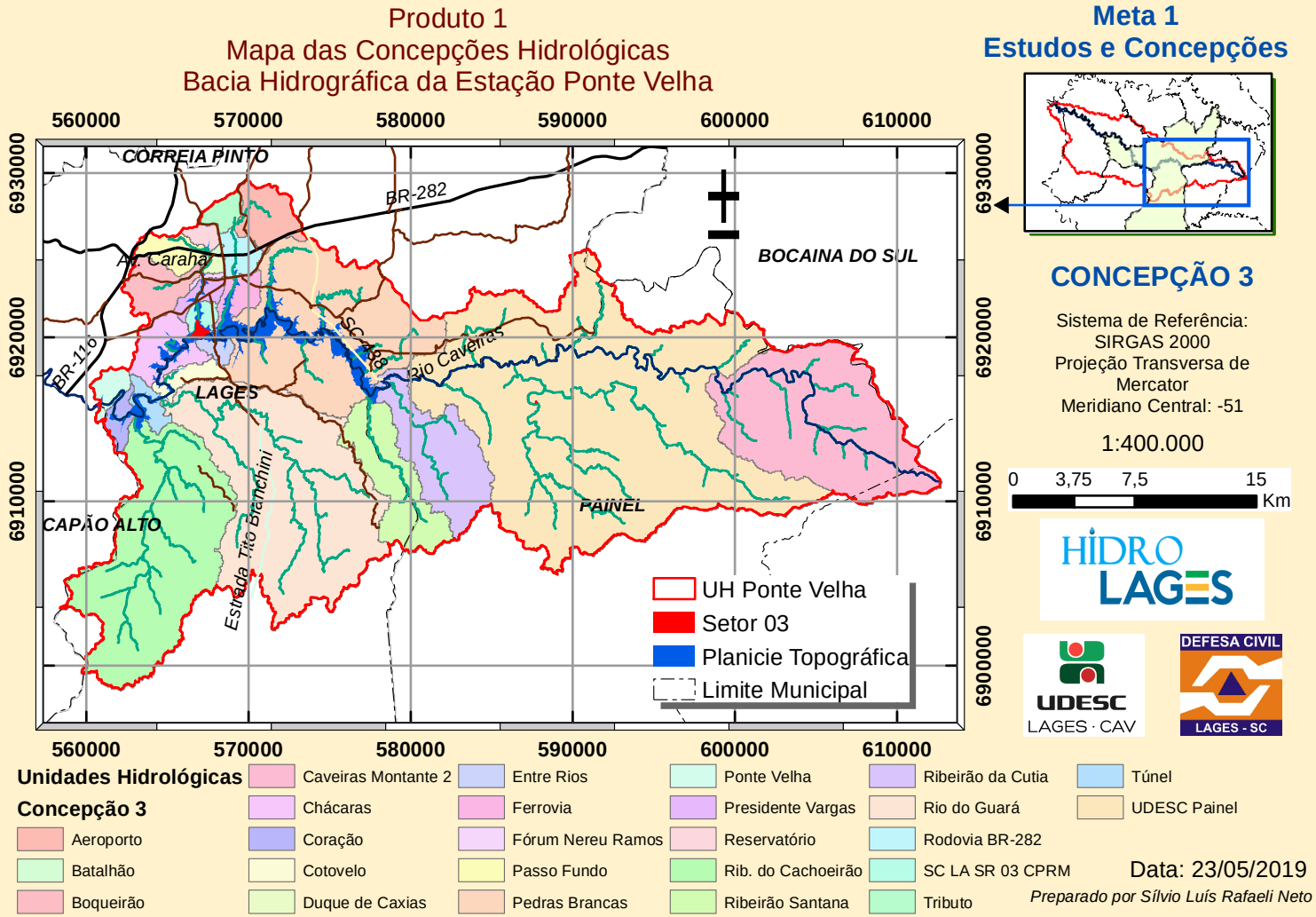
Tabela 3 – Valores de CN para as unidades hidrológicas urbanas e rurais segundo os grupos hidrológicos de solo e o mapa de uso e ocupação da terra.

Classe de uso e ocupação da terra	Grupo hidrológico de solo			
	A	B	C	D
Área Urbana	77	85	90	92
Campo Nativo	36	59	75	83
Mata Nativa	36	52	62	69
Agricultura	64	76	84	88
Reflorestamento	36	52	62	69
Água	10	10	10	10
Solo Exposto	70	80	87	90

Fonte: adaptado de Sartori et al. (2005), Tucci (2009), Collischonn & Dornelles (2013).

Estas planilhas são fundamentais, pois como mencionado anteriormente, o HEC-HMS funciona por meio de dados tabulares. Portanto, a consolidação destas planilhas é uma etapa simples, mas muito importante.

Figura 4 - Unidades hidrológicas (UHs) da Concepção 3 utilizada para a modelagem hidrológica do sistema hidrológico da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha.



Fonte: Relatório Técnico da Meta 1 – Estudos e Concepções.

A sétima e última etapa de idealização, consiste na construção do arquivo que vai carregar todos os dados consolidados durante as etapas anteriores. Neste momento constrói-se a o esquema topológico das bacias e de seus canais de interligação, todos os parâmetros das UH são adicionados à estas, e ainda, são criados arquivos em branco para a futura inserção dos dados de séries temporais dos eventos de precipitação, vazão e outros fenômenos hidrológicos. Esta etapa encerra a preparação do modelo conceitual, e a partir da criação e exportação do modelo, as simulações podem ser iniciadas.

4 Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha

O HEC-HMS em sua versão 4.3, é constituído por sete grandes componentes de gerenciamento: o módulo de bacia, o meteorológico, de especificações de controle, de séries temporais, de dados pareados (curvas de estruturas hidráulicas), de dados em grade e regiões em grade.

O **módulo de gerenciamento de bacias** é o fundamental, visto que é a partir dele que são definidos os parâmetros de representação física da bacia. Dentro deste, existem módulos para cada uma das unidades hidrológicas, onde são definidos os métodos de cálculo de perdas por infiltração; de transformação do escoamento superficial direto (ESD) em vazão; de decomposição do escoamento de base; de interceptação da vegetação; de armazenamento nas depressões da superfície e de propagação da onda de cheia pelo canal (USACE, 2018).

Com esta possibilidade de particionamento da bacia hidrográfica em unidades de resposta hidrológicas menores, o modelo torna-se útil ao calcular as vazões simuladas em cada um dos exutórios. Estes pontos são denominados de junções, e atuam como pontos de controle de vazões em locais onde originalmente não existe este tipo de monitoramento. As junções são versões computacionais de seções transversais de canais, onde são instaladas estações reais para monitoramento fluviométrico e obtenção de vazões.

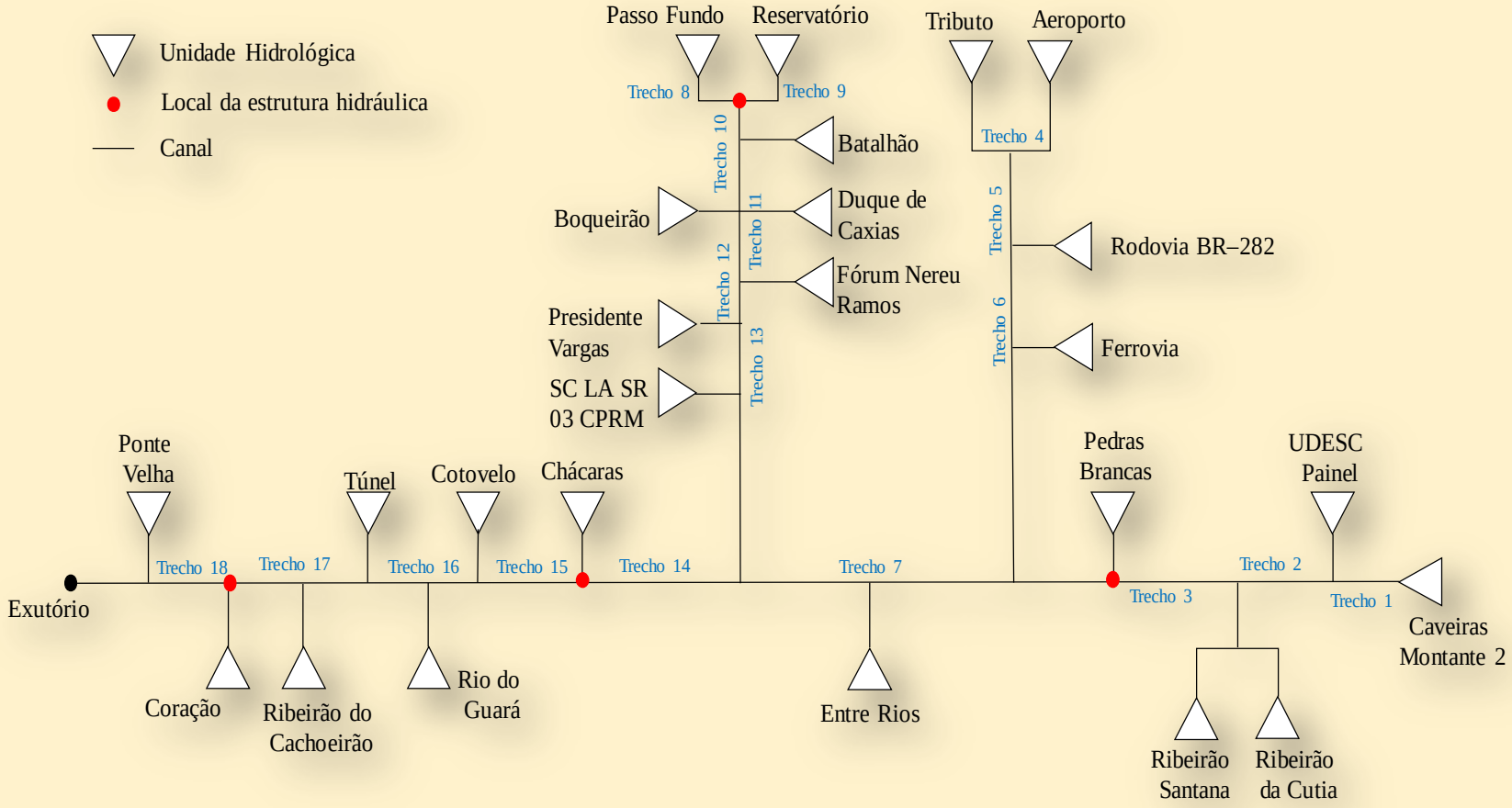
O módulo de bacias hidrográficas é composto por componentes denominados de Elementos Hidrológicos, que conectados dentro do aplicativo, fornecem a rede topológica do fluxo de água. Os elementos que compõem o módulo de bacias são apresentados na Tabela 4. A construção do modelo conceitual da bacia hidrográfica é realizada pela inserção dos elementos hidrológicos (Figura 5) que representam os cenários a serem simulados, e associado a cada um destes elementos está um conjunto de métodos de cálculo.

Tabela 4 – Descrição dos elementos hidrológicos conceituais do modelo hidrológico HEC-HMS.

Símbolo Pictórico	Elemento Hidrológico	Função
	Sub-bacia (unidade hidrológica)	Representa as características físicas (área, condições de contorno e parâmetros iniciais) das unidades hidrológicas que compõem o modelo.
	Trecho de Rio	Transporta o escoamento das unidades hidrológicas em direção a jusante.
	Reservatório	Representa as bacias de detenção/retenção e reservatórios de barragens ou outras estruturas de amortecimento de volumes.
	Junção	Combina escoamentos em pontos de controle estrategicamente posicionados, oriundos de diferentes elementos hidrológicos.
	Desvio	Transporta o escoamento do canal principal para fora da rede principal.
	Fonte	Introduz fontes de água dentro da bacia hidrográfica
	Exutório	Representa o ponto final de todo o escoamento da bacia hidrográfica.

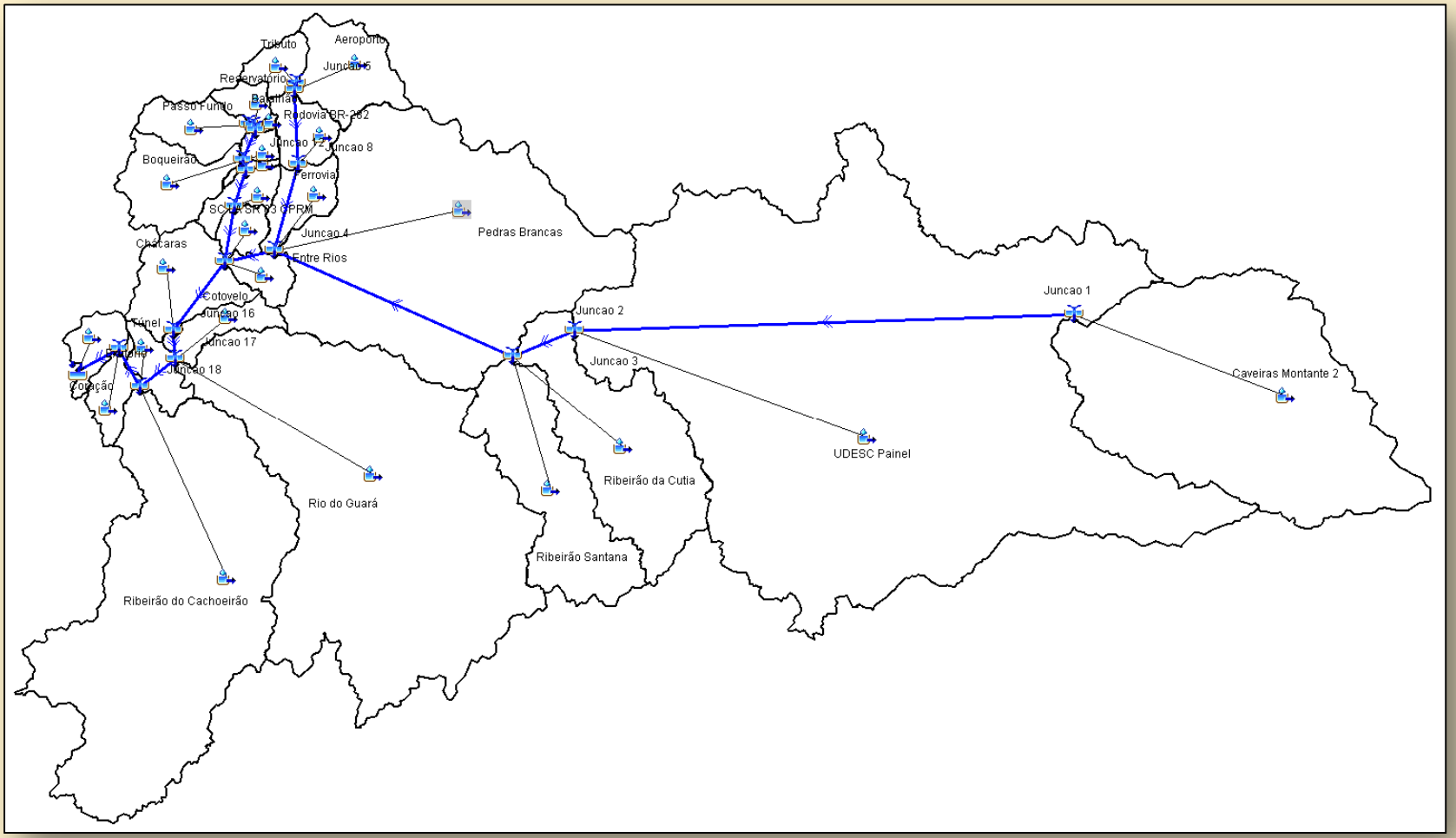
Fonte: adaptado de USACE (2018).

Figura 5 – Diagrama unifilar de escoamento dos trechos de canal e das unidades hidrológicas que contribuem para o modelo hidrológico da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha.



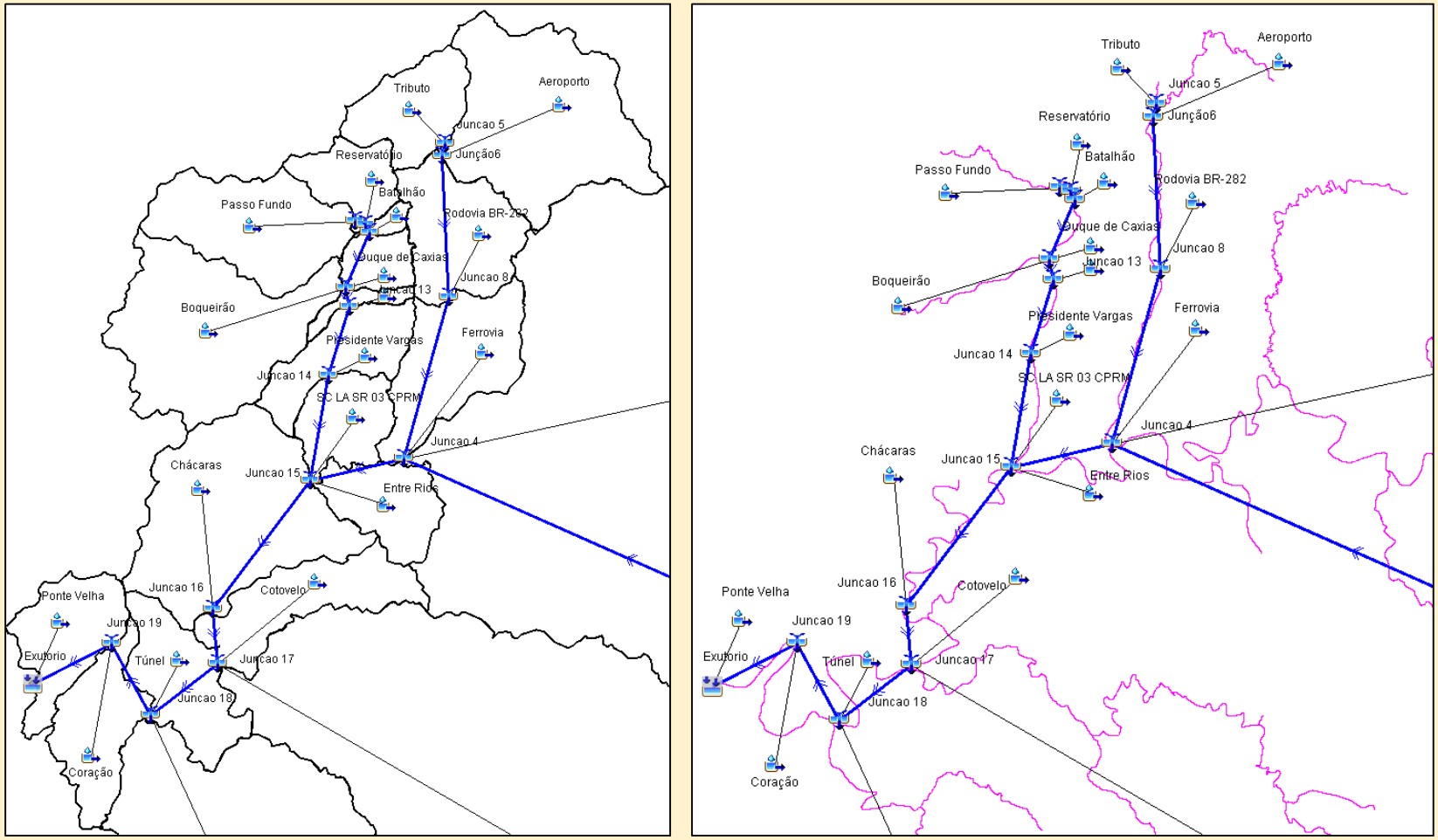
Fonte: A autora.

Figura 6 - Modelo conceitual para a modelagem hidrológica do projeto Hidro-Lages no HEC-HMS.



Fonte: A autora.

Figura 7 - Detalhe do modelo conceitual nas bacias urbanas dos rios Ponte Grande e Carahá.



Fonte: A autora.

O módulo de gerenciamento de bacias está baseado no modelo conceitual construído durante o pré-processamento dos dados geográficos. As unidades hidrológicas definidas anteriormente são as sub-bacias, e as ligações entre estas são efetuadas por junções e por trechos de canais. As estruturas hidráulicas adicionais são inseridas conforme os cenários de teste forem desenvolvidos. Por fim, no exutório, o modelo entende este ponto como o final do escoamento e o local onde a vazão observada pode ser comparada ao que foi produzido nas simulações.

Os módulos de gerenciamento meteorológico, de especificações de controle e de séries temporais estão associados em termos de funcionamento. O gerenciador de séries temporais requer a entrada das séries de precipitação, vazão e evapotranspiração potencial observadas para um longo histórico ou para um único evento. A distribuição destes dados pode ser feita por meio de equações, grades ou por metodologias definidas pelo usuário do aplicativo.

Visto que os modelos hidrológicos realizam a transformação chuva-vazão, a principal entrada de água nos modelos é a precipitação. A precipitação caracteristicamente apresenta grande variação temporal e espacial em sua distribuição, e mesmo que a chuva represente um fenômeno contínuo no espaço, as medições pluviométricas são consideradas discretas e localizadas em alguns pontos da unidade de resposta hidrológica. Desta maneira, é necessário extrapolar a distribuição espacial da chuva através de técnicas que ponderam a influência da precipitação espacialmente.

Neste estudo, a extrapolação das precipitações utilizou a metodologia dos polígonos de Thiessen, que ponderam a chuva em relação à área de influência, quando não existe uma distribuição uniforme de pluviômetros na bacia hidrográfica. Este método é utilizado em áreas de grande extensão, sendo calculado pela seguinte expressão:

$$P_m = \frac{\sum A_i P_i}{A} \quad (1)$$

Onde P_m é a precipitação média na bacia (mm), P_i é a precipitação no posto *i* (mm), A_i é a área de influência do posto e A é a área total da bacia hidrográfica. A geração dos polígonos de Thiessen foi realizada de forma automatizada através da utilização do ArcGIS 10.5.

As estações ou postos pluviométricos utilizados para a coleta dos dados de séries históricas de precipitação foram escolhidos no entorno da região de estudo, evidenciando aquelas que possuíssem dados sem falhas, para os eventos de enchentes ocorridos em Lages. Estas informações foram colhidas no site da Agência Nacional de Águas (ANA), para as seguintes estações: Bocaina do Sul (02749035), Lages (02750005), Coxilha Rica (02850004), Painel (02750007) e Vila Canoas (02749031).

O módulo de especificações de controle delimita o intervalo de tempo em que as simulações foram efetuadas, neste caso aproximadamente 30 dias para o evento de inundação escolhido.

Períodos curtos de tempo, como descrito neste estudo, caracterizam a modelagem orientada para eventos, ou seja, para momentos críticos. Assim, os métodos de cálculo descritos mais adiante, foram todos escolhidos de forma a descreverem de maneira adequada o comportamento de eventos de curta duração (algumas horas a poucos dias) que não são influenciados por movimentos de aquíferos e não simulam processos de balanço hídrico completo, por exemplo. Ainda, neste componente foram indicados de forma precisa o dia e hora de início e fim das simulações, além do passo de tempo para a computação, se diário ou sub-horário.

No módulo meteorológico foram indicadas as estações pluviométricas, fluviométricas ou climáticas associadas a cada uma das unidades hidrológicas. Diante das ponderações efetuadas, foram criadas estações meteorológicas "virtuais" com as precipitações ponderadas especificamente para cada UH existente. Algumas destas estão sob influência de uma mesma estação de monitoramento pluviométrico e, portanto, receberam a mesma quantidade de precipitação para o evento simulado.

O evento de precipitação escolhido para as simulações iniciais do cenário original da bacia hidrográfica foi o ano de 2005. Suas características são muito importantes para que fosse definido como o evento-chave deste estudo.

Entre os pontos principais estão o fato de que existem dados de monitoramento fluviométrico confiável para este evento, além de ter sido um fenômeno muito representativo do comportamento da grande maioria das enchentes que ocorrem na região do mapeamento realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), denominada de SC LA SR 03. Maiores detalhes sobre comportamento hidrológico do evento de 2005 são apresentados na **Parte 2** do presente relatório. Os dados de vazão observados para este evento foram obtidos junto ao site da ANA, para a estação fluviométrica Ponte Velha.

O **módulo de dados pareados** é utilizado especificamente quando são inseridas estruturas hidráulicas no modelo hidrológico conceitual. Neste caso, os elementos hidrológicos que representam as barragens, canais extravasores, bacias de detenção e todas as outras estruturas idealizadas no Projeto Hidro-Lages, exigem a descrição do comportamento das estruturas de descarga (vazões de entrada e saída) que as alimentam. Os dados que seguem curvas pareadas são as relações de cota-vazão, cota-área, cota-volume, taxa de vazão de entrada e saída, curvas de descarga de estruturas, entre outros.

A descrição destes elementos não será realizada em detalhe neste documento, pois a modelagem hidrológica dos cenários de intervenção será realizada prioritariamente com o uso de aplicativos de modelagem hidrodinâmica. Todavia, os resultados obtidos a partir das simulações hidrológicas do evento de 2005 serão utilizados como dados de entrada para este modelo. Assim, pode-se dizer que os modelos da família HEC realizam o acoplamento entre si, pelo fato de que os resultados de uns, alimentam as simulações dos outros.

Os **módulos de dados em grade e de regiões em grade**, tratam de parâmetros que são inseridos segundo pontos no espaço,

ou seja, estão distribuídos de forma heterogênea pela unidade hidrológica, segundo informações contidas em dados matriciais.

Neste caso, os parâmetros de entrada que possuem significado físico devem ser inseridos no modelo após medições ou coletas a campo, ou podem ser obtidos através de cálculos e geoprocessamento de dados espaciais. Contudo, os dados de entrada são calibrados para que a simulação atinja o êxito almejado.

Na calibração dos modelos utilizam-se diversos métodos e funções-objetivo, que permitem o ajuste mais apropriado das vazões de pico, tempo de pico e volume escoado. Dados hidrometeorológicos observados são utilizados para auxiliar neste ajuste. Estas etapas podem conduzir à perda do detalhamento original que os mapas georreferenciados carregam consigo, pois prioriza-se sempre a qualidade do ajuste global de parâmetros do modelo, em detrimento da manutenção do nível de detalhe original dos dados em grade.

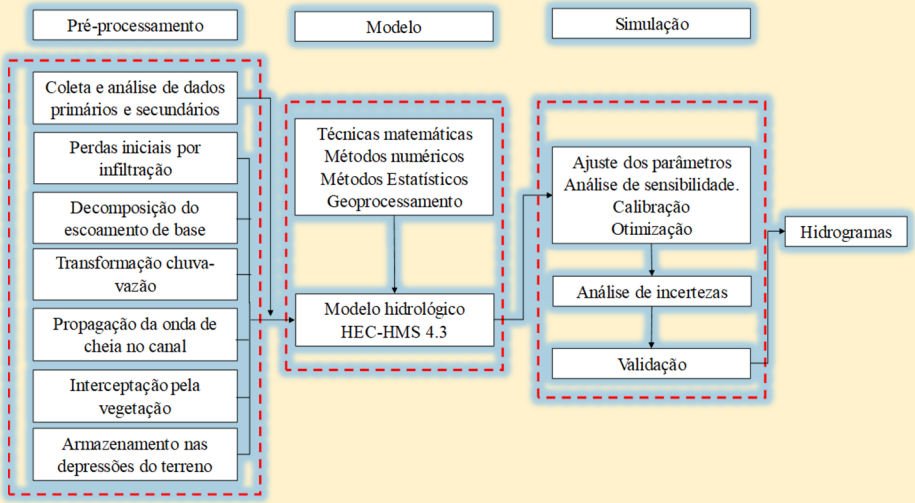
5 Parâmetros e critérios para a modelagem hidrológica no projeto Hidro-Lages

Os itens a seguir, descrevem os métodos de cálculo escolhidos para as simulações hidrológicas do modelo (Figura 6), a importância de seu uso e quais os valores utilizados para a descrição do sistema morfológico das UH.

5.1 A interceptação pela vegetação

A interceptação da chuva pelo dossel vegetativo pode afetar o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica e a hidrologia de algumas regiões que apresentam grande quantidade de vegetação, retendo-a acima da superfície do solo. O modelo hidrológico entende que as florestas realizam a remoção de parte da precipitação e realizam sua devolução à atmosfera pelo processo de evapotranspiração.

Figura 8 – Fluxograma geral das etapas da modelagem hidrológica com o aplicativo HEC-HMS 4.3



Em regiões de Mata Atlântica, a vegetação apresenta capacidade de retenção de 4,2% até 52,4% da precipitação incidente (ALVES, DIAS, *et al.*, 2007; MOURA, CORREA, *et al.*, 2012;

DINIZ, PEREIRA, *et al.*, 2013). Em geral, um percentual de 20,65% da precipitação pode ser removido das alturas precipitadas. Em áreas de reflorestamento de eucaliptos, a interceptação máxima atinge percentual médio de 16,20% do total.

Apesar de sua relevância, poucos estudos hidrológicos consideram este tipo de cálculo dentro dos modelos. Nos processos de transformação chuva-vazão que são computados nos modelos, a interceptação pode influenciar nas quantidades de água que estão disponíveis no perfil do solo no início das simulações.

As medições a campo consideram que a determinação do total interceptado está armazenada em diferentes compartimentos. A precipitação é subdividida em precipitação interna, escoamento pelo tronco das árvores e pelo total interceptado. No entanto, tais volumes são influenciados por fatores climáticos como a intensidade e volume precipitado, chuva antecedente, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar, e radiação solar (LIVESEY, BAUDINETTE e GLOVER, 2012).

O método utilizado para a modelagem da interceptação da precipitação pela vegetação é denominado de Dossel Simples. Este método exige a determinação da capacidade de armazenamento máximo que a vegetação apresenta, em milímetros, e também a condição inicial de água armazenada na vegetação, que representa a umidade inicial (RICARDO, 2018).

A capacidade de armazenamento de água que a vegetação possui está atrelada ao tipo e a estrutura da vegetação. Para o cálculo dos parâmetros de entrada no modelo, utilizou-se metodologia (BENNETT e PETERS, 2000) que sugere valores para tipos de vegetação, como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Armazenamento de água pela interceptação da precipitação para diferentes tipos de vegetação superficial.

Tipo de Vegetação	Interceptação (mm)
Vegetação em geral	1,270
Gramíneas e árvores deciduais	2,032
Árvores que não perdem as folhas e árvores coníferas	2,540

Fonte: adaptado de Bennett e Peters (2000).

Desta forma, cada uma das unidades hidrológicas foi quantificada em termos de vegetação, aplicando-se uma ponderação entre os valores contidos na Tabela 5 e as áreas correspondentes às classes de uso e ocupação da terra existentes na bacia hidrográfica. A agricultura foi classificada como vegetação em geral; enquanto as matas nativas e reflorestamentos foram classificadas como árvores que não perdem folhas, pois a mata nativa predominante na região de estudo não apresenta características de deciduidade acentuada. Por fim, aos campos nativos foram atribuídos os valores tabelados para as gramíneas. As outras classes de uso da terra, como núcleo urbano, corpos d'água e solo exposto não foram classificadas nesta análise, por não apresentarem feições vegetativas.

O mapa de uso e ocupação da terra foi obtido através da aplicação de técnicas de geoprocessamento, pela metodologia de classificação supervisionada de imagens de satélites. Para a

caracterização do uso e ocupação da terra no período anterior ao evento de inundação ocorrido em 2005, foram utilizadas imagens do sensor Landsat–5 para o ano de 2004. Este mapa é oriundo dos estudos de modelagem hidrológica (PADILHA, 2017) e foram disponibilizados pelo autor.

O cruzamento das informações contidas nos mapas com aquelas constantes nos estudos de Bennett e Peters (2000), gerou uma planilha de valores iniciais, utilizados como parâmetros de entrada para o modelo. Estes valores foram calibrados, e os resultados finais para cada uma das UH em estudo são apresentados na Tabela 6.

Tais valores foram inseridos no modelo hidrológico, considerados como os valores máximos de armazenamento da vegetação. Já o armazenamento inicial no início da simulação (%) foi mantido em zero para todas as UH, pois considerou-se a simulação com 100% de disponibilidade de armazenamento de água, até a chegada no patamar máximo disponível, ou ainda, que não havia precipitação antecedente ao evento de 2005. Os valores apresentados são aqueles obtidos após a calibração do modelo hidrológico.

Os valores obtidos para o armazenamento máximo, representam a remoção de uma parcela significativa das alturas precipitadas que são inseridas no módulo de séries temporais. Os valores de interceptação variam entre 1,78 e 7,67 mm, o que sinaliza que a vegetação contribui com uma parcela relativamente grande do total que é removido do escoamento superficial direto.

Tabela 6 – Valores de armazenamento máximo no dossel (mm) para as UHs da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha.

Unidade Hidrológica	Max Canopy Storage (mm)
Aeroporto	4,44
Batalhão	1,78
Boqueirão	2,69
Caveiras Montante 2	3,82
Chácaras	2,91
Coração	2,84
Cotovelo	2,79
Duque de Caxias	4,68
Entre Rios	5,11
Ferrovia	3,79
Fórum Nereu Ramos	2,21
Passo Fundo	4,26
Pedras Brancas	7,67
Ponte Velha	2,04
Presidente Vargas	2,32
Reservatório	2,42
Rib. Do Cachoeirão	7,59
Ribeirão da Cutia	4,23
Ribeirão Santana	7,40
Rio do Guará	4,39
Rodovia BR-282	3,67
SC LA SR 03 CPRM	2,55
Tributo	3,68
Túnel	2,15
UDESC Painel	3,37

5.2 O armazenamento nas depressões do terreno e o escoamento superficial direto

Parte da precipitação é retida temporariamente na superfície do terreno, em depressões ou locais de retenção naturais. Este volume é contabilizado tanto em termos de infiltração lenta até sua evaporação, sendo removida do ciclo hidrológico. O armazenamento de água em depressões do terreno é representado pelo modelo hidrológico, através da aplicação do método Simple Surface.

Os parâmetros de entrada exigidos pelo modelo são muito semelhantes aos exigidos para o método de interceptação da vegetação: uma estimativa do armazenamento inicial, em porcentagem; e também, o armazenamento máximo, em milímetros. O primeiro destes, informa se houve algum evento de precipitação antecedente, que pode ter preenchido parcialmente as depressões do terreno antes do evento em estudo. Já o armazenamento máximo determina até que ponto as superfícies podem reter volumes, sem que isto contribua para o escoamento superficial direto.

Este modelo considera que o volume armazenado nas depressões segue em processo de infiltração mesmo que o reservatório não esteja completamente cheio. O escoamento superficial direto é iniciado quando o reservatório da superfície está completamente cheio e promove o transbordamento do volume excedente.

O armazenamento é muito dependente da declividade média encontrada nas unidades hidrológicas e também da cobertura vegetal

superficial. Para a obtenção dos valores exigidos, foram utilizados os estudos de Fleming (2002), que propôs valores padrões para a determinação do armazenamento a partir dos mapas de declividades e de uso e ocupação da terra.

Método semelhante à ponderação efetuada para a determinação das taxas de interceptação pelo dossel vegetativo, foi aplicado ao cálculo do armazenamento nas depressões do terreno. Realizou-se o cruzamento entre os valores contidos em planilhas na literatura, e os valores de declividade disponíveis no mapa de declividades da bacia hidrográfica.

Tabela 7 – Armazenamento de água nas depressões da superfície do solo para diferentes declividades e cobertura do terreno.

Descrição	Declividade (%)	Armazenamento na superfície
Áreas impermeáveis ou pavimentadas	NA	3,18 – 6,35
Terreno plano e franzido ou rugoso	0 a 5	50,8
Inclinação moderada a suave	5 a 30	6,35 – 12,70
Inclinação suave a íngreme	> 30	1,02

Fonte: adaptado de Fleming (2002).

Todas as UH em estudo foram enquadradas na classe de declividades de terreno plano e franzido ou rugoso, que é característico do relevo suave e ondulado das planícies da região. Mesmo as áreas que se apresentam densamente urbanizadas e pavimentadas, atingem no máximo 64% de impermeabilização, em locais que possuem declividades acima de 5%. O armazenamento inicial (Initial Storage) foi considerado como zero, para que o modelo considerasse a inexistência de precipitações antecedentes ao evento de 2005.

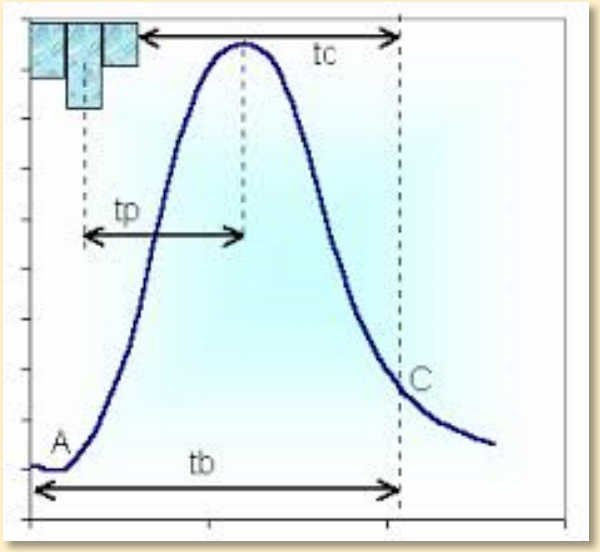
Tabela 8 – Valores de armazenamento máximo nas depressões da superfície do terreno (mm) para as UHs da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha.

Unidade Hidrológica	Max. Storage (mm)
Aeroporto	8,87
Batalhão	2,11
Boqueirão	4,24
Caveiras Montante 2	11,31
Chácaras	4,43
Coração	10,27
Cotovelo	4,14
Duque de Caxias	2,6
Entre Rios	8,84
Ferrovia	9,03
Fórum Nereu Ramos	4,18
Passo Fundo	4,47
Pedras Brancas	13,04
Ponte Velha	10,49
Presidente Vargas	5,3
Reservatório	4,88
Rib. Do Cachoeirão	12,38
Ribeirão da Cutia	11,57
Ribeirão Santana	11,13
Rio do Guará	4,79
Rodovia BR-282	8,99
SC LA SR 03 CPRM	6,58
Tributo	8,3
Túnel	9,83
UDESC Painel	10,78

Após o preenchimento das depressões na superfície do terreno, com a continuidade da precipitação incidente, há o início do escoamento superficial direto, que é representado no modelo hidrológico pelos hidrogramas de resposta das UH.

Um hidrograma típico produzido por chuvas intensas, apresenta uma curva com um pico único, ou picos múltiplos quando existem eventos sequenciais, variações abruptas na intensidade da chuva, ou uma recessão anormal do escoamento. O comportamento típico de um hidrograma é apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Hidrograma típico de uma seção de controle.



Os trechos de um hidrograma são: trecho de ascensão (A), trecho de recessão (B) e pico. O comportamento ascendente (A) é o aumento da vazão devido às contribuições do escoamento superficial e subterrâneo. O ponto máximo é o pico da vazão, também denominada de ¨vazão de pico¨ e ocorre no tempo *tp*. Este tempo é computado a partir do centro de gravidade dos blocos de chuvas efetivas (chuva que se converteu em escoamento superficial). O tempo de concentração (*tc*) é o tempo a partir do qual toda a bacia de captação está contribuindo para compor a vazão no exutório. A recessão é o período em que o curso d´água diminui a vazão em virtude da diminuição do aporte de volumes ao canal. O ponto C marca o momento a partir do qual a vazão no canal se deve, exclusivamente, à contribuição subterrânea.

Os fatores que influenciam na forma do hidrograma são:

a) Relevo: composto principalmente pelas características fisiográficas e parâmetros morfométricos, tais como densidade de drenagem, capacidade de armazenamento, declividade, aspectos das vertentes, forma da bacia, entre outros.
b) Uso e ocupação da terra: a presença ou ausência de cobertura vegetal pode proporcionar aumento da interceptação ou aumento do escoamento superficial, respectivamente. Áreas urbanas e intensamente impermeabilizadas tendem a produzir picos mais altos e acelerar o escoamento.
c) Tipo de solo: interfere na quantidade de água que consegue infiltrar-se no perfil e que não é convertido em precipitação efetiva.
d) Modificações artificiais no canal: os rios podem estar sujeitos a modificações provocadas por obras de engenharia,

como reservatórios, canalizações, cortes de meandros, entre outros, que modificam o comportamento original do hidrograma.

Estes fatores podem ou não compor parâmetros do modelo. Isso é determinado sobre como o modelo está concebido. Alguns modelos são bem detalhados e consideram inúmeros parâmetros. Outros procuram ser mais parcimoniosos e consideram um número limitado de parâmetros.

Alguns valores iniciais de parâmetros podem ser obtidos por conhecimento tácito ou por conhecimento técnico-científico. Alguns dados podem ser encontrados na literatura, em dados cartográficos, vetoriais ou matriciais, ou obtidas por meio de mensurações a campo.

Portanto, a escolha dos métodos de cálculo utilizados no modelo hidrológico deve levar em consideração a disponibilidade de informações que forneçam características específicas de cada uma das unidades de resposta hidrológica consideradas no estudo. Diante da disponibilidade do Modelo Digital de Terreno de alta resolução espacial disponibilizado pela SDS (2013), as informações sobre os fluxos superficiais e subsuperficiais baseados na topografia, foram computados e extraídos deste MDT.

O modelo hidrológico HEC-HMS, em sua versão 4.3, dispõe de onze métodos de transformação da precipitação efetiva em vazão. Diante da disponibilidade de informações sobre a bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha, optou-se pelo cálculo das perdas iniciais de precipitação e a transformação da precipitação efetiva em vazão através do Método do Hidrograma Unitário do SCS (Soil Conservation Service, atual NRCS ou National Resources Conservation Service). Este método é muito empregado pelos hidrólogos, devido aos parâmetros serem de fácil obtenção na literatura, além de ter aplicação em bacias que variam de 3 km² a 250 km².

Ele está baseado no conceito do hidrograma unitário, que foi proposto em 1932 por Sherman, usando 1cm de altura de chuva excedente para estabelecer um modelo de hidrograma, que foi adaptado por Snyder em 1938, para a obtenção de um hidrograma sintético, que é o ideal para bacias hidrográficas não monitoradas.

As hipóteses que baseiam a construção do hidrograma unitário através do método do SCS, são (TOMAZ, 2012):

a) A intensidade da chuva efetiva é constante durante toda a tormenta que irá produzir o hidrograma;
b) A chuva efetiva é distribuída uniformemente em toda a área de drenagem da unidade hidrológica;
c) O tempo de base ou o tempo de duração do hidrograma de deflúvio superficial direto para uma chuva de duração unitária é constante;
d) Os efeitos de todas as características fisiográficas de uma área de drenagem são refletidos na forma do hidrograma, mas não os da sazonalidade.

Uma das consequências do método do hidrograma unitário será a produção linear de vazão como resposta a uma chuva efetiva. O método não considera armazenamentos temporários nas UHs, o que pode superestimar as vazões em eventos críticos.

A altura pluviométrica efetiva é a altura total das águas das chuvas, descontando-se as perdas causadas pela infiltração e evapotranspiração. O modelo hidrológico HEC-HMS utiliza a relação de separação do escoamento, que é dada pela equação:

$$P_{ef} = \frac{(P - 0{,}2 \cdot S)^2}{P + 0{,}8 \cdot S} \quad (2)$$

Onde **P*ef*** é a precipitação efetiva em milímetros, **P** é a precipitação total em milímetros, e **S** é a capacidade máxima de armazenamento do solo no início da tormenta. Esta equação é válida toda vez que P> 0,2*S, ou seja, quando a altura precipitada é superior às perdas iniciais (**Ia**) por infiltração, senão o valor de P*ef* adotado é zero.

O valor de S é obtido através dos mapas de uso e ocupação da terra e também do mapa pedológico, que descreve o tipo de solo existente em cada unidade hidrológica, dando origem ao CN (curve number). O CN é um índice de escoamento adimensional, que varia de 1 a 100, onde os valores mais altos indicam tanto uma alta taxa de impermeabilização quanto de alto escoamento. A equação que descreve a capacidade de armazenamento do solo é a seguinte:

$$S = \left(\frac{25400}{CN}\right) - 254 \quad (3)$$

Em ambiente SIG, o valor do CN para cada uma das unidades hidrológicas foi obtido e ponderado por área. Os valores de CN para as UH são apresentados na Tabela 9.

Uma análise dos valores encontrados para o CN nas unidades hidrológicas, demonstra que os valores obtidos após a calibração do modelo estão adequados, variando entre 53,05 a 93,77.

Tabela 9 - Os valores de CN para as UHs da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha.

Unidade Hidrológica	CN	Taxa de Impermeabilização (%)
Aeroporto	65,75	15
Batalhão	66,13	64
Boqueirão	78,88	43
Caveiras Montante 2	79,13	2
Chácaras	93,77	20
Coração	71,97	2
Cotovelo	61,5	11
Duque de Caxias	88,01	64
Entre Rios	64,39	10
Ferrovia	80,75	43
Fórum Nereu Ramos	71,05	64
Passo Fundo	81,87	13
Pedras Brancas	56,46	3
Ponte Velha	65,85	5
Presidente Vargas	67,68	64
Reservatório	76,87	29
Rib. Do Cachoeirão	78,21	2
Ribeirão da Cutia	53,05	3
Ribeirão Santana	75,38	2
Rio do Guará	73,62	2,5
Rodovia BR-282	90,32	40
SC LA SR 03 CPRM	76,59	51

Unidade Hidrológica	CN	Taxa de Impermeabilização (%)
Tributo	81,11	20
Túnel	63,51	8
UDESC Painel	70,16	2

A taxa de impermeabilização das unidades hidrológicas é um parâmetro de entrada no modelo hidrológico, e também é bastante representativa, pois aquelas que apresentam os maiores valores estão localizadas nos bairros densamente ocupados. Estes locais contemplam os bairros centrais da área urbana, com taxas de mais de 60% de impermeabilização. De maneira geral, as UHs localizadas no núcleo urbano ou nas proximidades deste, são as mais impermeabilizadas percentualmente e apresentam os maiores valores de CN, o que contribui de forma importante para o aumento do escoamento superficial direto e diminui as taxas de infiltração no início da chuva.

Os valores de abstração ou perda inicial foram ajustados durante o processo de calibração do modelo e análise de sensibilidade, variando de zero a 2 mm. Este valor pode ser considerado baixo, em relação aos valores normalmente identificados em cálculos manuais para este mesmo método. No entanto, a utilização de métodos de cálculo adicionais para a remoção de água do escoamento superficial direto também foi utilizada, conforme descrito anteriormente.

O uso de métodos de cálculo para determinação da parcela de chuva que fica retida pela interceptação da vegetação e pelo armazenamento das depressões do solo mostraram-se mais sensíveis dentro do modelo. Isso significa que dentro da planície de inundação de estudos, os fenômenos mencionados acima são significativos, principalmente, por se tratar de uma bacia bem preservada e com áreas de amortecimento de cheias ao longo do canal principal.

Após a determinação da parcela que é removida da precipitação efetiva, o modelo realiza o cálculo do escoamento superficial direto. Para esta etapa, optou-se pela manutenção do método do SCS, evitando a desconectividade entre as fórmulas empregadas.

O método do Hidrograma Unitário do SCS consiste em multiplicar as precipitações efetivas pelos valores de ordenadas obtidos para o hidrograma unitário da bacia hidrográfica em estudo. Este método sugere três equações para a construção do hidrograma unitário, em função do tempo de pico (**tp**), do tempo de ascensão (**ta**) e do tempo de base (**tb**). As equações são descritas a seguir:

$$ta = 0{,}6 \cdot tc + \frac{\Delta t}{2} \quad (4)$$

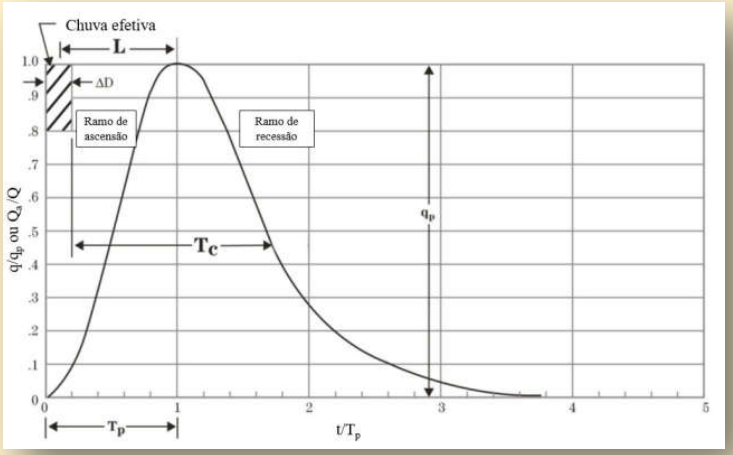
$$tb = 2{,}67 \cdot ta \quad (5)$$

$$qp = \frac{0{,}208 \cdot A}{ta} \quad (6)$$

$$\Delta t = \frac{0{,}6 \cdot tc}{5} \quad (7)$$

Onde **A** é a área da bacia em km² e **Δt** é o intervalo de tempo em horas. Todas estas equações estão implícitas no modelo, não sendo necessário definir os valores destes parâmetros, mas apenas informar o primeiro deles, que dará origem a todos os outros automaticamente, que é o tempo de concentração (tc). O Tempo de Concentração de uma bacia, sub-bacia ou unidade hidrológica é o tempo necessário para o escoamento do ponto mais distante da bacia chegue até seu exutório. Ou seja, o tempo até que toda a bacia esteja contribuindo para a vazão, atingindo seu ponto de inflexão.

Figura 10 – Hidrograma Unitário SCS adimensional.



Fonte: adaptado de NRCS (2004).

Neste caso, optou-se por definir um parâmetro que está relacionado ao cálculo do tempo de concentração, que é o Tempo de Retardo (Lag Time). Este parâmetro é o intervalo entre o centro de massa da precipitação e o centro de massa do hidrograma unitário.

A obtenção deste parâmetro ocorreu de forma automática, através dos pré-processamentos realizados preliminarmente às simulações. Este parâmetro não foi calibrado, mantendo-se seu valor original, pois está assentado em cálculos que levam em consideração informações das UH que não são variáveis em uma escala temporal pequena.

O aplicativo HEC-GeoHMS utiliza as seguintes equações para o cálculo do Lag Time (USACE, 2018):

$$Lag = \frac{(L^{0,8} \cdot (S+1)^{0,7})}{(1900 \cdot Y^{0,5})} \quad (8)$$

Onde **L** é o comprimento hidráulico do canal mais longo na unidade hidrológica (m), e **Y** é a declividade da bacia (%). O **S** é obtido através de uma variação da equação apresentada anteriormente para o CN, mas que gera o mesmo resultado numérico.

Para a realização do cálculo automático destes valores, foram inseridos no aplicativo o mapa de declividades da bacia da Estação Ponte Velha, o mapa de vetores para os canais mais longos

existentes (Longest Flowpath) e o mapa produzido para a determinação do CN.

5.3 O escoamento de base

O escoamento de base é uma parte da vazão que chega ao exutório que tem contribuições do fluxo subterrâneo, do lençol freático, fruto da recarga subterrânea. Ao longo do período de chuvas, é grande volume que atinge os lençóis freáticos, através da percolação profunda. Durante estes períodos o nível da água em profundidade se eleva, a ponto de contribuir com os canais. Ele é responsável por alimentar o fluxo dos rios quando ocorrem períodos de estiagem.

A parte decrescente dos hidrogramas após o encerramento das precipitações, é definida como recessão do hidrograma, e reflete a redução no nível dos aquíferos, que passam a contribuir com as vazões. O cálculo do escoamento superficial direto obtido pelo método do Hidrograma Unitário do SCS produz o hidrograma que contém a contribuição do escoamento de base da unidade hidrológica. Portanto, esta contribuição pode ser extraída através da aplicação de técnicas de separação (COLLISCHONN e TASSI, 2008).

A separação do escoamento de base utiliza-se métodos que avaliam a hidrógrafa, e buscam estimar os pontos de inflexão, calculando-se para isto, uma constante de depleção ou de recessão (**k**). A recessão dos hidrogramas apresenta um comportamento em forma de uma exponencial decrescente (MELLO e SILVA, 2013), por este motivo optou-se pelo método de cálculo da recessão exponencial.

A constante de depleção é obtida manualmente através da análise dos últimos valores de vazão em um hidrograma natural observado na bacia hidrográfica, plotando-se num papel mono-log os valores de vazão, até que seja atingido um ponto onde o comportamento da curva torna-se uma linha reta.

Sugere-se que o comportamento da vazão de um canal que é alimentado pelo escoamento de base pode ser representado por meio de uma equação do tipo:

$$Q_{(t)} = Q_0 \cdot e^{\frac{-t}{k}} \quad (10)$$

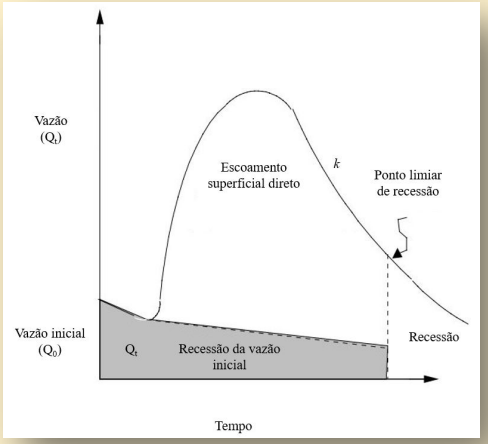
Onde **t** é o tempo, $\mathbf{Q_0}$ é a vazão num instante t0, $\mathbf{Q_{(t)}}$ é a vazão num instante t (algum tempo após t0), **e** é o logaritmo neperiano, e **k** é a constante de depleção/recessão

De maneira geral, a definição deste valor é considerada relativamente difícil, sendo necessário estimar o valor da constante **k** através do uso de valores conhecidos de vazão, espaçados por um intervalo de tempo, aplicando-se a equação:

$$k = \frac{-\Delta t}{ln\left(\frac{Q_{(t+\Delta t)}}{Q_{(t)}}\right)} \quad (11)$$

.

Figura 11 – Separação do escoamento de base do escoamento superficial direto.



Fonte: adaptado de USACE (1994).

O valor de ***k*** depende muito das características físicas da UH, em especial de suas características geológicas. As bacias da região em estudo estão localizadas na Bacia do Paraná, que apresenta derrames basálticos maciços com espessura entre 15 e 25 m e rochas sedimentares areníticas. Há uma estrutura especialmente interessante, resultado de processos de magmatismos, que formam o Domo de Lages em torno do núcleo urbano. Essa formação geológica representou descontinuidades no embasamento, após uma elevação de 1100 a 1200 m (LOCZY, 1968), onde as unidades estratigráficas mais antigas apresentam-se em cotas similares às unidades mais novas (SANTA CATARINA, 2016).

As bacias hidrográficas que apresentam rochas sedimentares, como aquelas encontradas na região bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha, possuem maior capacidade de armazenamento de água subterrânea, e os rios que drenam estas áreas apresentam valores de *k* relativamente altos. Já as bacias onde há derrames basálticos, onde as rochas são pouco porosas, apresentam valores de *k* mais baixos.

Considerando-se estas informações, a definição do limiar de recessão, ou seja, do ponto onde ocorre a inflexão do escoamento superficial direto e o escoamento de base assume a vazão, foi definido preliminarmente pela divisão de vazão de um dia pela vazão do dia anterior. Isto foi feito até que se atingisse uma relação significativamente menor que todos os valores obtidos anteriormente, significando que não haveria vazão do ESD na hidrógrafa.

O valor da constante de recessão obtido na região do exutório foi de 0,9. Este valor foi considerado padrão para todas as unidades hidrológicas. Este método é considerado apenas preliminar, por ser subjetivo e, portanto, exigiu que os valores da constante de recessão fossem calibrados para a obtenção de valores adequados ao modelo.

Estudos (PILGRIM e CORDERY, 1992) indicam que, conforme o valor obtido para a constante de recessão, é possível

determinar se a contribuição ao escoamento do canal é oriunda do escoamento subterrâneo, subsuperficial ou do escoamento superficial direto (Tabela 10).

Tabela 10 – Valores típicos da constante de recessão (k) de acordo com a vazão antecedente da bacia.

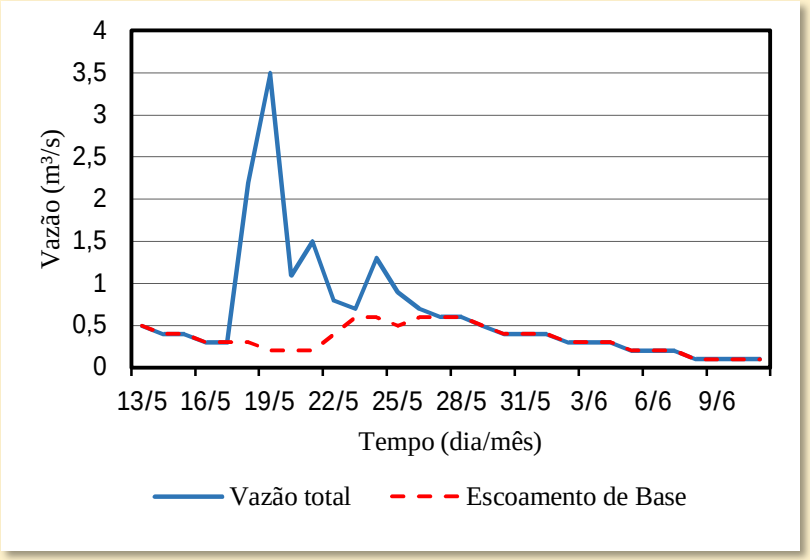
Composição da vazão	Constante de recessão diária
Subterrânea	0,95
Subsuperficial	0,8 – 0,95
Escoamento superficial direto	0,3 – 0,8

Tabela 11 – Valores da Constante de Recessão (k) para as UHs da bacia hidrográfica da Estação Ponte Velha.

Unidade Hidrológica	k
Aeroporto	0,7245
Batalhão	0,7307
Boqueirão	0,7261
Caveiras Montante 2	0,8479
Chácaras	0,6385
Coração	0,7441
Cotovelo	0,872
Duque de Caxias	0,8371
Entre Rios	0,9396
Ferrovia	0,7751
Fórum Nereu Ramos	0,8958
Passo Fundo	0,5234
Pedras Brancas	0,8025
Ponte Velha	0,7256
Presidente Vargas	0,8759
Reservatório	0,6981
Rib. Do Cachoeirão	0,7026
Ribeirão da Cutia	0,7664
Ribeirão Santana	0,7725
Rio do Guará	0,7991
Rodovia BR-282	0,7121
SC LA SR 03 CPRM	0,9044
Tributo	0,7494
Túnel	0,8798
UDESC Painel	0,9906

Percebe-se que a maioria das unidades hidrológicas neste estudo são regidas por escoamento predominantemente originado superficialmente, pois encontram-se entre 0,5234 e 0,7991. Pouca contribuição do escoamento de base é observada nas UHs urbanas, como apresentado no exemplo da Figura 12.

Figura 12 – Hidrograma da vazão total e do escoamento de base para a UH Presidente Vargas, localizada no núcleo urbano de Lages.



Fonte: A autora.

Apenas UHs que estão posicionadas em regiões de cabeceira da bacia hidrográfica, ou que estão nas bordas, próximas aos divisores de águas, e apresentam solos mais rasos, possuem valores mais altos associados à constante de recessão. No entanto, o ajuste por meio de calibração pode resultar em alguns valores extremos, como o caso da UH UDESC Painel, onde o modelo ajustou um valor considerado alto, a fim de compensar outros valores mais baixos, sem perder a qualidade final do modelo.

Por isso, ao se realizar uma boa calibração dos modelos hidrológicos, é possível estabelecer os hidrogramas de base para unidades hidrológicas não-monitoradas ao se transferir os parâmetros que são conhecidos na região do exutório. No entanto, estes valores não são absolutos, e podem ser obtidos de forma mais precisa a campo através de medições que fazem uso de isótopos e outras tecnologias que rastreiam a origem das moléculas de água. Em avaliações aproximadamente expeditas, como o caso deste estudo, onde não foram efetuadas análises aprofundadas da qualidade da água dos aquíferos regionais, os valores apresentados podem ser considerados adequados ao seu propósito.

5.4 A propagação da onda de cheia nos canais

O objetivo da modelagem de propagação da onda de cheia nos rios é determinar o comportamento do hidrograma das vazões em determinadas seções, com base nos hidrogramas conhecidos a montante somados aos hidrogramas do próprio trecho que as conduz.

Uma onda de cheia executa dois movimentos importantes ao trafegar nos canais: a translação e a atenuação. A translação é a propagação da onda ao longo do espaço, o que geralmente ocorre sem que haja mudanças no formato do hidrograma. A atenuação ocorre quando um hidrograma é amortecido ao passar por um trecho mais largo ou com baixa declividade. De maneira geral, a propagação da onda é uma forma de somar todos os escoamentos que contribuem para os hidrogramas ao longo do tempo e do espaço (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

As equações que embasam os cálculos da propagação da onda no canal são a equação da continuidade e da conservação da quantidade de movimento. De acordo com o princípio da

conservação da massa, a variação da massa de água ao longo de um pequeno intervalo de tempo, em um volume de controle qualquer, deve ser igual à diferença entre a massa que está entrando e que está saindo do volume.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (12)$$

O princípio da conservação da quantidade de movimento diz que a soma das forças sobre um corpo é igual à variação da quantidade de movimento do corpo ao longo do tempo. A quantidade de movimento é produto da massa vezes a velocidade.

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (13)$$

Ambos os princípios descrevem as equações de Saint-Venant, que são utilizadas para explicar matematicamente os comportamentos de translação, amortecimento e efeitos de remanso que podem ocorrer nos rios. No entanto, as soluções para estas equações não são triviais, e exigem modelos computacionais específicos, pois não existem soluções analíticas para estes modelos (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Desta forma, os modelos de propagação de onda de cheia apropriam-se dos princípios matemáticos descritos anteriormente, mas com o uso de equações simplificadas para os modelos computacionais existentes. Para simular este processo, utilizou-se o método de cálculo de Muskingum-Cunge, que efetua o cálculo dos hidrogramas de jusante a partir dos hidrogramas de montante, realizando sua translação. Ele está baseado nas equações de difusão simplificadas, que são aproximadas pelo método das diferenças finitas (USACE, 2018).

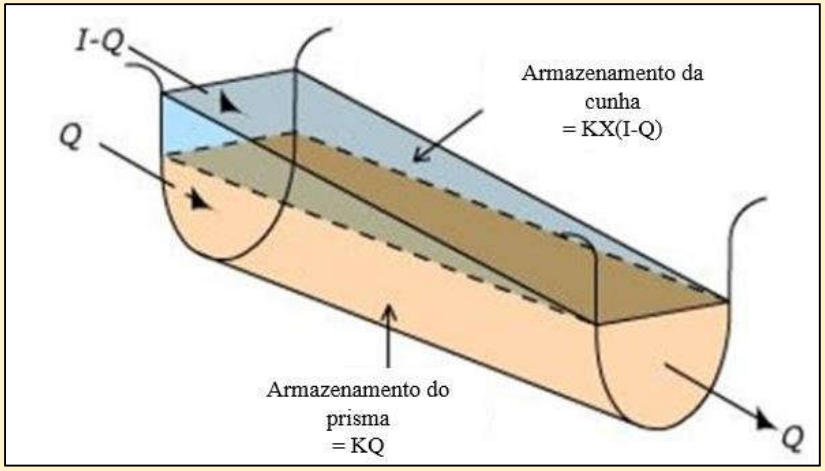
$$\left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2}\right) \cdot \left(\frac{Q_{t-1} + Q_t}{2}\right) = \left(\frac{S_t + S_{t-1}}{t}\right) \quad (14)$$

Onde **I** representa a entrada do escoamento em determinado trecho de canal, **Q** a saída do escoamento do trecho, **S** o armazenamento no trecho e **t** o passo de tempo da simulação.

Conceitualmente, o método de Muskingum, que é a base deste método utilizado, define que os armazenamentos dos volumes na calha do canal são em formato de prisma em sua face superior, onde há o escoamento permanente, em forma de cunha, quando se trata do volume que escoa pelo perfil da seção molhada.

A Figura 13 apresenta o esquema de representação do armazenamento dos volumes na calha dos rios, e as principais variáveis utilizadas nas equações intrínsecas ao modelo hidrológico. Na ilustração, **K** representa o tempo de trânsito no trecho do canal e **X** a constante de ponderação do armazenamento tanto para reservatórios como canais, que é o caso do volume da “cunha”. Deste modo, com base na Figura 13, o volume de armazenamento total entre as seções de montante e jusante deste trecho, em um determinado passo de tempo **t**, é descrito pela equação (15).

Figura 13 – Armazenamento aproximado dos volumes em um canal de acordo com o método de Muskingum.



Fonte: Chow et al. (1988).

$$S_t = K[XI_t + (1 - X) \cdot Q_t] \quad (15)$$

Os valores dos parâmetros **K** e **X** são estimados pelas características dos rios em análise. Neste estudo, foram reunidas informações que pudessem caracterizar de forma apropriada as características dos rios Caveiras, Carahá e Ponte Grande, a partir de informações obtidas por meio de visitas a campo e de análises das ortoimagens disponibilizadas pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina.

Os parâmetros são obtidos através das equações a seguir.

$$K = \frac{\Delta x}{C} \quad (16)$$

$$X = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{Q}{B \cdot c \cdot S_0 \cdot \Delta x}\right) \quad (17)$$

Onde tem-se **Δx** como o comprimento entre a seção de montante e jusante do trecho do canal, **C** a velocidade da onda de cheia, estando relacionada com a geometria da calha do canal, $\mathbf{Q_0}$ a vazão de referência do hidrograma de montante, **B** a largura superior da área transversal do canal e $\mathbf{S_0}$ a declividade da calha do canal.

Isolando as variáveis que são desconhecidas no passo de tempo **t** e unindo a equações 14 e 15, pode-se obter:

$$Q_t = \left[\frac{t + 2XK}{2K(1 - X) + t}\right] I_t + \left[\frac{t + 2XK}{2K(1 - X) + t}\right] I_{t-1} + \left[\frac{2K(1 - X) - t}{2K(1 - X) + t}\right] \quad (18)$$

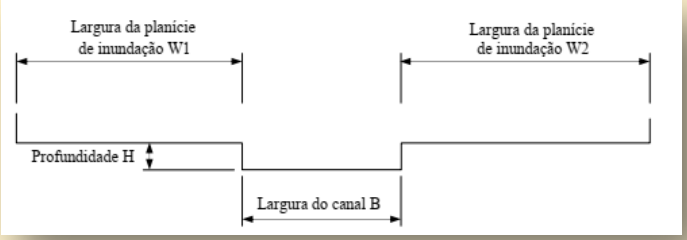
Desta forma, a equação 18 é resolvida para cada passo de tempo t, computando o hidrograma de jusante a partir do hidrograma de montante. Percebe-se que as variáveis de entrada para a definição dos parâmetros X e K são dados de fácil obtenção.

A largura dos canais (B) foi medida em campo durante levantamentos batimétricos e também avaliada por meio de ortoimagens. Os comprimentos dos rios (Δx) foram definidos através

do geoprocessamento de dados topográficos das UHs. A geometria das seções transversais foi considerada trapezoidal, que é padrão para dimensionamento de canais naturais e artificiais.

Alguns parâmetros são definidos por sub-trechos, em virtude de que o método de Muskingum-Cunge simula a propagação da onda de cheia em um trecho L e subdivide-os em N sub-trechos de comprimento Δx. A declividade dos sub-trechos foi definida automaticamente em ambiente SIG, com auxílio dos mapas de declividade. A declividade dos taludes laterais foi padronizada em uma relação de 1:1 em todos os sub-trechos. O coeficiente de rugosidade de Manning (n) foi mantido em um valor padrão calibrado de 0,066. E por fim, uma vazão arbitrária foi calculada com base na vazão específica obtida através da vazão média observada na estação Ponte Velha, e ponderada por área acumulada.

Figura 14 – Modelagem da forma dos sub-trechos de canal que realizam a interligação entre as UH do modelo hidrológico.



Fonte: (JICA, 2011).

O método de Muskingum-Cunge foi escolhido para este estudo, pois é considerado o mais adequado para a representação do escoamento em eventos de cheias naturais e em locais com declividades acentuadas (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). Também porque existe certo retardamento no escoamento devido ao efeito de contenção que existe na planície topográfica de inundação.

Recomenda-se que, adicionalmente, sejam realizadas as simulações em modelos que não simplificam o escoamento nos canais, como as plataformas de simulação HEC-RAS, que utilizam modelos hidrodinâmicos mais avançados, que resolvem as equações de Saint-Venant numericamente e permitem análises complexas dos fenômenos que acontecem nos canais.

A Figura 15 apresenta os dados de entrada adotados para o modelo hidrológico com o método de propagação de onda cheia de Muskingum-Cunge.

6 Análise de sensibilidade e calibração do modelo

Diante do número elevado de parâmetros inseridos em um modelo hidrológico, e da necessidade de calibração destes modelos para que suas respostas sejam as mais adequadas à representação dos fenômenos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, a análise de sensibilidade surge como uma forma de minimizar o tempo dispendido nesta etapa.

A análise de sensibilidade é um dos métodos que permitem avaliar o quanto o modelo é sensível aos parâmetros escolhidos para

a sua descrição. Este método identifica quais destes parâmetros possuem influência significativa sobre os resultados das simulações (VAN GRIENSVEN, MEIXNER, *et al.*, 2006).

Estudos demonstram que apenas uma pequena parte dos parâmetros de um modelo são responsáveis pela modificação nas respostas hidrológicas, podendo todos os outros serem mantidos em valores padrões ou iguais aos inicialmente adotados (WANG et al., 2013).

Devido ao grande número de parâmetros inseridos nos modelos hidrológicos, a análise de sensibilidade torna-se uma ferramenta importante ao identificar quais são os mais sensíveis, e que devem ser objeto de teste durante a etapa de calibração do modelo. O desconhecimento dos parâmetros mais sensíveis pode conduzir a resultados menos eficientes e gasto elevado de tempo em ajustes desnecessários (LENHART, ECKHARDT, *et al.*, 2002) (BENNETT e PETERS, 2000).

Existem dois tipos de análises de sensibilidade para parâmetros hidrológicos: a análise *one-at-a-time*, que avalia um parâmetro por vez, sendo mantidos todos os outros constantes, ou a análise de sensibilidade global, que avalia todos os parâmetros juntos, modificando-os todos ao mesmo tempo. Para este estudo, optou-se pela avaliação individual, com calibrações definidas para cada parâmetro por vez. Esta etapa permitiu a avaliação dos efeitos que cada um dos elementos possui sobre o hidrograma simulado.

Figura 15 – Dados de entrada no modelo hidrológico utilizando o método de propagação de onda cheia de Muskingum-Cunge.

Canais	Initial Type	Initial Discharge (m³/s)	Lenght (m)	Slope (m/m)	Manning's "n"	Space-Time Method	Index Method	Index Flow (m³/s)	Shape	Width (m)	Side Slope (xH:1V)
Trecho 1	Specified discharge	0.0081162	30188.16	0.012813	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	2.7514	Trapezoid	50	1
Trecho 2	Specified discharge	0.0081162	19973.59	0.019627	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	3.0309	Trapezoid	40	1
Trecho 3	Specified discharge	0.0081162	34938.49	0.009198	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	3.9933	Trapezoid	20	1
Trecho 4	Specified discharge	0.0081162	9381.31	0.009532	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	0.12627	Trapezoid	7	1
Trecho 5	Specified discharge	0.0081162	6055.74	0.011303	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	0.17083	Trapezoid	7	1
Trecho 6	Specified discharge	0.0081162	6427.52	0.024563	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	0.22028	Trapezoid	7	1
Trecho 7	Specified discharge	0.0081162	5672.85	0.027419	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	4.0222	Trapezoid	30	1
Trecho 8	Specified discharge	0.0081162	3707.74	0.028398	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	0.0772848	Trapezoid	5	1
Trecho 9	Specified discharge	0.0081162	1488.28	0.031495	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	0.0804428	Trapezoid	5	1
Trecho 10	Specified discharge	0.0081162	2414.84	0.013563	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	0.093223	Trapezoid	15	1
Trecho 11	Specified discharge	0.0081162	2037.22	0.017264	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	0.18785	Trapezoid	17	1
Trecho 12	Specified discharge	0.0081162	3353.36	0.01341	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	0.21902	Trapezoid	20	1
Trecho 13	Specified discharge	0.0081162	3357.09	0.008794	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	0.24505	Trapezoid	20	1
Trecho 14	Specified discharge	0.0081162	8874.21	0.016195	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	4.3693	Trapezoid	30	1
Trecho 16	Specified discharge	0.0081162	5872.66	0.020058	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	5.4145	Trapezoid	30	1
Trecho 15*	Specified discharge	0.0081162	8073.47	0.012847	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	4.411	Trapezoid	40	1
Trecho 17	Specified discharge	0.0081162	6145.53	0.019835	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	6.2244	Trapezoid	45	1
Trecho 18	Specified discharge	0.0081162	3760.36	0.03888	0.066	Auto DX Auto DY	Flow	6.26	Trapezoid	45	1

Fonte: A autora.

Em análises de sensibilidade de parâmetros utilizados para a simulação de eventos de inundações ou simulações de curtos períodos, os grandes grupos que dominam a sensibilidade ao modelo são aqueles que utilizam variáveis dependentes do uso e ocupação da terra e dos aspectos pedológicos. Assim, o usuário também pode ajustar quais variáveis devem ser investigadas, de acordo com seu conhecimento prévio sobre a bacia, ou com base em análises automáticas.

Os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade ao modelo hidrológico adotado foram:

a) Curve Number (CN);
b) A abstração inicial da chuva efetiva;
c) A constante de recessão (k);
d) O limiar de recessão;
e) O armazenamento máximo do dossel vegetativo;
f) O armazenamento máximo nas depressões do terreno.

A sua sensibilidade foi verificada visualmente em um primeiro momento, visto que a mínima variação em qualquer destes parâmetros produzia uma significativa alteração no formato do hidrograma resultante no exutório. Diante da definição da sensibilidade deste conjunto de parâmetros de entrada, iniciou-se a

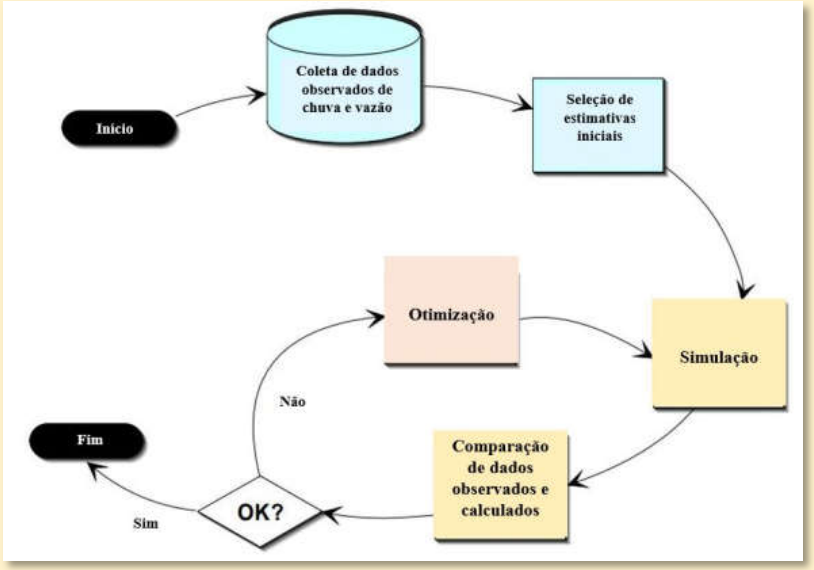
etapa de calibração do modelo, considerando-se apenas variações no grupo de seis parâmetros selecionado.

A etapa de calibração utiliza os dados hidrometeorológicos observados no exutório da área de estudos, para a comparação com os dados simulados, a fim de atingir o melhor ajuste nos parâmetros do modelo. Dentro do HEC-HMS este processo é denominado de otimização, pois aplica algoritmos iterativos que buscam a solução ótima para cada uma das variáveis de entrada (USACE, 2018).

Conforme apresentado pela Figura 16, a calibração inicia-se pela coleta de dados observados e sua inserção no modelo hidrológico. Os dados observados utilizados são, geralmente, vazões obtidas em estações de monitoramento fluviométrico.

O processo de calibração pode ser realizado por meio de tentativa e erro, ou de forma automática. Neste primeiro caso, são feitas alterações manuais nos valores dos parâmetros sensíveis, até a obtenção de uma resposta adequada. Já a calibração automática, é relizada por meio de definição de intervalos de teste. Realizou-se a calibração automática do modelo hidrológico, pela definição de um intervalo de valores máximos e mínimos que o software pudesse testar, utilizando-se conhecimento prévio do comportamento morfológico das UH para o estabelecimento da amplitude de variação.

Figura 16 – Procedimento de otimização das variáveis de entrada do modelo hidrológico.



Fonte: adaptado de USACE (2000).

O CN, por exemplo, pode variar de 0 a 100, no entanto, foi ajustado para variar dentro de uma amplitude paramétrica que apresente significado físico real. Ou seja, para este parâmetro, o software realizou a calibração automática na faixa de 50 a 99. Para o parâmetro da constante de depleção/recessão (k) foi estabelecido um limite de variação entre 0,5 e 1,0, considerando-se que valores abaixo de 0,5 são extremamente raros.

Para todos os outros parâmetros foram mantidos os limites máximos e mínimos estabelecidos pelo próprio software, a fim de

que a calibração com liberdade de variação numérica produzisse o melhor ajuste possível. Além disto, estes parâmetros estão ligados à calibração de valores associados a alturas de precipitação e de vazões iniciais, que não são facilmente conhecidas ou determinadas em eventos de curta duração.

A etapa de calibração deve ser realizada diversas vezes, até que a comparação entre os valores simulados e obervados não seja muito discrepante no ponto de controle, que é o exutório. Enquanto existirem diferenças entre estes dois hidrogramas, os valores dos parâmetros são ajustados, algumas vezes manualmente e em outras vezes, automaticamente.

A calibração dos parâmetros do modelo HEC-HMS baseou-se nas enchentes ocorridas no ano de 2005, dada a sua boa representatividade do comportamento geral das unidades hidrológicas. Esta etapa buscou fazer com que o hidrograma observado neste evento coincidisse com o hidrograma simulado pelo modelo.

O ajuste automático dos valores foi realizado por meio de um algoritmo chamado de Simplex. Ele ajusta cada um dos valores em cada uma das unidades hidrológicas conjuntamente, através de um processo iterativo. O analista escolhe apenas o número máximo de iterações permitidas, que seja interessante até a convergência dos valores, e também define a tolerância, ou seja, até que ponto os valores devem ser testados, em termos de qualidade de ajustamento nas últimas casas decimais.

Quando o software atinge os valores mais satisfatórios globalmente, ele produz um relatório que contém todos os parâmetros originais e os novos valores calibrados. Apresenta ainda, o comparativo visual dos hidrogramas sobrepostos, e também a qualidade do ajuste estatístico através de funções objetivo previamente selecionadas.

Para um modelo hidrológico chuva-vazão, como o HEC-HMS, o que se busca prioritariamente é que os volumes de ambos os hidrogramas (observado e simulado) sejam semelhantes; que a vazão de pico esteja muito próxima entre eles; que o comportamento de ascenção e recessão do hidrograma seja semelhante, principalmente em termos de contabilização do escoamento de base; e que a função-objetivo seja maximizada, no caso da equação de Nash-Sutcliffe.

A ilustração do resultado desta calibração, para a enchente de 2005, é discutida com maior detalhe na **Parte 2** deste estudo. Os detalhes da calibração do modelo de análise de escoamentos constam de avaliações sobre o comportamento que os parâmetros do modelo apresentam diante de testes de variação. Existem dificuldades em se definir se o valor numérico apresentado para cada um dos parâmetros pode ser considerado adequado ou não, portanto, eles devem ser analisados individualmente (como apresentado durante este relatório) e também em termos de efeito conjunto, que resulta na análise dos hidrogramas simulados.

6.1 Funções-objetivo na qualidade dos ajustes

Os índices de avaliação das simulações são utilizados para comparar o hidrograma simulado ao hidrograma observado, através de análise estatística realizada por meio de equações denominadas de funções-objetivo (USACE, 2000).

Para este modelo hidrológico, optou-se pela utilização da função-objetivo mais tradicional nas avaliações de modelos, que é o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), desenvolvido pelos autores que dão nome à equação (NASH e SUTCLIFFE, 1970). Sua formulação é a seguinte:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{n}\left(X_{obs,i} - X_{sim,i}\right)^2}{\sum_{t=1}^{n}\left(X_{obs,i} - \bar{X}_{obs}\right)^2} \qquad (19)$$

Onde $\mathbf{X_{obs}}$ são os valores observados e $\mathbf{X_{sim}}$ são os valores obtidos na modelagem em um dado tempo **i**, e $\bar{\boldsymbol{X}}$ é a média da série de vazões observadas. O NSE varia de $-\infty$ a 1, e a melhor qualidade de ajuste dos dados é verificada próximo de 1. Uma eficiência próxima de 0, indica que os parâmetros do modelo se aproximam da média dos dados observados e, por conseguinte, um índice negativo indica que a média dos dados observados é melhor do que o próprio modelo.

A avaliação do sucesso de ajuste do modelo por meio da função de Nash-Sutcliffe, pode ser realizada pela sua comparação aos valores estabelecidos pela literatura (Tabela 12). A calibração do modelo hidrológico resultou em um índice de eficiência de **NSE = 0,901**. Isto indica que a calibração atingiu um patamar de sucesso, e pode ser considerada excelente. O ajuste dos volumes, do pico do hidrograma e do próprio comportamento da hidrógrafa estão muito próximos dos valores observados, mas ainda contém certa discrepância.

Tabela 12 – Critérios de avaliação de desempenho da função-objetivo NSE.

Avaliação	NSE
Excelente ou muito bom	NSE > 0,75
Bom	0,65 < NSE ≤ 0,75
Aceitável	0,50 < NSE ≤ 0,65
Não satisfatório	NSE ≤ 0,50

Fonte: adaptado de Rauf e Ghumman (2018).

O gráfico de dispersão das vazões indica que o ajuste do modelo é muito bom para a reprodução de vazões baixas, pois estas se agrupam quase perfeitamente à linha de tendência das vazões. No entanto, para valores mais altos, existe certa dispersão nas simulações, o que pode prejudicar o ajuste de valores de pico do hidrograma simulado ao observado (Figura 17).

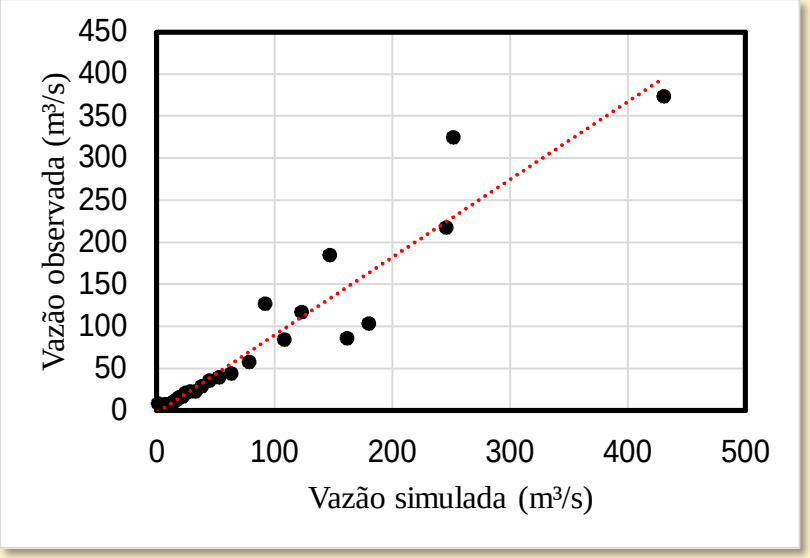
Isto indica que na simulação de eventos com picos de vazão acima de 150 m³/s, a qualidade do ajuste dos valores pode ser diferente daqueles obtidos nas estações de monitoramento fluviométrico. A fuga dos valores à linha de tendências, demonstra que alguns parâmetros selecionados apresentam tendências de superpredição, ou seja, que tornam o hidrograma maior do que

originalmente deveria ser. Assim, novas simulações sempre manterão a tendência de superestimativa das vazões.

Neste estudo, o modelo hidrológico calibrado não foi submetido a etapas de validação com séries históricas de outros eventos, pois os cenários de intervenções estruturais estão baseados na construção de precipitações sintéticas, ou precipitações de projeto. Ainda assim, o espalhamento de pontos no entorno da curva de tendências não é extremo, e com ajuste da função-objetivo considerada excelente, o modelo pode ser utilizado para a simulação de vazões nos cenários de implantação de medidas estruturais.

Os modelos calibrados para um tipo de evento em uma bacia hidrográfica não devem ser utilizados em outras bacias ou em outros modelos hidrológicos, sem que haja perda da qualidade do ajuste. Portanto, o modelo hidrológico descrito neste estudo deve ser utilizado apenas para os propósitos aos quais foi criado.

Figura 17 – Gráfico de dispersão do valores simulados e observados para o evento de inundação ocorrido em 2005.



Fonte: A autora.

7 Referências

ALVES, R. F., et al. Avaliação da precipitação efetiva de um fragmente o de mata atlântica em diferentes estágios de regeneração no município de viçosa, MG. **Revista Ambiente & Água**, 2 (1): 83-93, 2007.

BENNETT, T. & PETERS, J. Continuous Soil Moisture Accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). **ASCE Technical Publication**, 8806(1):1–10, 2000. ALVES, R. F. et al. Avaliação da precipitação efetiva de um fragmento de mata atlântica em diferentes estágios de regeneração no município de viçosa, MG. **Revista Ambiente & Água**, v. 2 (1), p. 83-93, 2007.

BALES, R. C. Hydrology, floods and droughts. **Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)**, p. 180-184, 2015.

BENNETT, T.; PETERS, J. Continuous Soil Moisture Accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). **ASCE Technical Publication**, v. 8806 (1), p. 1-10, 2000.

BRUNNER, G. W. **River analysis system**. Davis, CA: U. S. Army Corps of Enginners: Hydrologic Engineering Center (HEC), 2016.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 384 p.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: ABRH, 2013. 350 p.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia**. [S.l.]: IPH, 2008. 151 p.

DE LIZ, M. S. M. **Influencia do rio Caveiras nas inundações dos rios Carahá e Ponte Grande**. Dissertação (mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ciências Ambientais. Lages, p. 166. 2018.

DINIZ, A. R. et al. Precipitação e aporte de nutrientes em diferentes estádios sucessionais de floresta atlântica. **Ciência Florestal**, Pinheiral - RJ, v. 23 (3), p. 389-399, 2013.

EMBRAPA, E. B. D. P. A. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos**, Rio de Janeiro, p. 83, 1979.

FELDMAN, A. D. **Hydrologic modeling system - HEC-HMS**. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers: Hydrologic Engineering Center (HEC), 2000.

JICA, A. D. C. I. D. J. **Estudo preparatório para o projeto de prevenção e mitigação de desastres na bacia do rio Itajaí**. [S.l.]. 2011. (V. III).

LENHART, T. et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 27, p. 645-654, 2002.

LIVESEY, S. J.; BAUDINETTE, B.; GLOVER, D. Rainfall interception and stem flow by eucalypt street trees - the impacts of canopy density and bark type. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 13 (1), p. 192-197, 2012.

LOCZY, L. Basic and alkalic volcanics of the State of Santa Catarina. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 40, p. 187-193, 1968.

MACHADO, N. C. **Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do Fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2017.

MAIDMENT, D. R. **GIS and hydrologic modeling**. New York: Oxford University Press, v. Cap. 14, 1993. 147-167 p.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Hidrologia:** princípios e aplicações em sistemas agrícolas. Lavras: UFLA, 2013. 455 p.

MING, L. **Sistema computacional para previsão de inundações: aplicação à bacia hidrográfica do rio São Bento - SC**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2007.

MOURA, A. E. S. S. et al. Precipitação Efetiva nos Períodos Chuvoso e Pouco Chuvoso em um Fragmento de Mata Atlântica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Recife - PE, v. 17 (7), p. 7-16, 2012.

NETO, S. L. R. **Análises morfométricas em bacias hidrográficas integradas em um sistema de informações geográficas.** Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 1994.

NETO, S. L. R. **Um modelo conceitual de sistema de apoio à decisão espacial para o gerenciamento de desastres por inundações.** Univeridade de São Paulo. São Paulo, p. 234. 2000. (in Portuguese).

NETO, S. L. R. et al. Efficacy of Rainfall-Runoff Models in Loose Coupling Spacial Decision Support Systems Modelbase. **Water Resources Management**, p. 889-904, 2019.

PADILHA, V. **Modelagem hidrológica orientada por eventos de inundação em Lages/SC**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 179. 2017.

PILGRIM, D. H.; CORDERY, I. **Handbook of hydrology**. Flood runoff. D.R. In: Maidment (Org.). New York. 1992.

PINHEIRO, A. Enchente e inundação. In: DOS SANTOS, R. F. **Vulnerabilidade ambiental:** desastres naturais ou fenômenos induzidos? Brasília: MMA, 2007. p. 192.

POOCH, U. W.; WALL, J. A. **Discreste event simulation:** a practical approach. Computer Engineering Series. ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1993.

PORTO, R. L. L. **Alguns aspectos da simulação matemática em hidrologia: exemplos de aplicação**. São Paulo. 1973.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental**. Ministério da Ciência e Tecnologia. [S.l.], p. 65. 2000.

RICARDO, G. S. **Impactos de cenários de mudanças climáticas no regime hídrico da bacia hidrográfica Passo Marombas**. Universidade do Estado de Santa Catarina. Lages, p. 127. 2018.

SANTA CATARINA. **Atlas Geográfico de Santa Catarina: diversidade e natureza**. Diretoria de Estatística e Cartografia. Florianópolis. 2016.

SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; LOMBARDI NETO, F. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo - Parte I: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, p. 05-18, 2005.

SCHIER, D. T.; SÁ, E. A. S.; DE LIZ, M. S. **Relatório técnico - construção de reservatórios de contenção de cheias no sistema ponte velha**. Lages. 2018.

SCHINA, B. et al. **Modelagem hidrológica com canal extravasor aplicada a eventos de inundações em Lages/SC**. Lages. 2018.

SIMON, H. A. **The new science of management decision**. New York: Harper and Row, 1960.

TOMAZ, P. **Método do SCS (Soil Conservation Service) para várias bacias**. Curso de manejo de águas pluviais. [S.l.], p. 24. 2012.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Universidade UFRGS, 1998.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRG, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia:** ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, ABRH, 2009. 943 p.

USACE, U. S. A. C. O. E. **Flood-runoff analysis, Engineer Manual - EM 1110-2-1417**. Washington, p. 214. 1994.

USACE, U. S. A. C. O. E. **Hydrologic Modeling System 4.3. HEC-HMS: user's manual**. [S.l.], p. 640. 2018.

VAN GRIENSVEN, A. et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**, v. 324, p. 10-23, 2006.

VEMURI, V. **Modeling complex systems:** an introduction. New York: Academic Press, 1978.

VERTESSY, R. A. et al. Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. **Journal of Hydrology**, v. 150, p. 665-700, 1993.