

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação de Mestrado

APRIMORAMENTO COMPUTACIONAL DO MODELO LAVRAS
SIMULATION OF HYDROLOGY (LASH):
APLICAÇÃO EM DUAS BACIAS DO RIO GRANDE DO SUL

Tamara Leitzke Caldeira

Pelotas, 2016

Tamara Leitzke Caldeira

**APRIMORAMENTO COMPUTACIONAL DO MODELO LAVRAS
SIMULATION OF HYDROLOGY (LASH):
APLICAÇÃO EM DUAS BACIAS DO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello

Pelotas, 2016

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

C146a Caldeira, Tamara Leitzke

Aprimoramento computacional do modelo Lavras
Simulation of Hydrology (LASH) : aplicação em duas bacias
do Rio Grande do Sul / Tamara Leitzke Caldeira ; Carlos
Rogério de Mello, orientador. — Pelotas, 2016.

213 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação
em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento
Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2016.

1. Modelagem hidrológica. 2. Bacia hidrográfica. 3. SIG.
4. Calibração automática. 5. Gestão de recursos hídricos. I.
Mello, Carlos Rogério de, orient. II. Título.

CDD : 627

Elaborada por Aline Herbstrith Batista CRB: 10/1737

Tamara Leitzke Caldeira

APRIMORAMENTO COMPUTACIONAL DO MODELO LAVRAS
SIMULATION OF HYDROLOGY (LASH):
APLICAÇÃO EM DUAS BACIAS DO RIO GRANDE DO SUL

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestra em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 26/02/2016.

Banca Examinadora:



.....
Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello (Orientador)

Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras



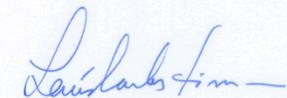
.....
Prof. Dr. Fabrício da Silva Terra

Doutor em Ciências (Solo e Nutrição de Plantas) pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo



.....
Dr. Léo Fernandes Ávila

Doutor em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas pela Universidade Federal de Lavras



.....
Prof. Dr. Luís Carlos Timm

Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo

A minha filha

Marina

Aos meus pais

Simone Leitzke & Mario Luis Caldeira

Aos meus avós

Maria Rosa & Anibal Caldeira

Adelaide Leitzke (*in memoriam*)

DEDICO.

Agradecimentos

Ao meu orientador, *Professor Dr. Carlos Rogério de Mello*, pela orientação e, sobretudo, pela competência técnico-científica, meu respeito e admiração.

Ao *Professor Dr. Samuel Beskow* e ao *Professor Dr. Marcelo Ribeiro Viola*, aos quais atribuo o mérito do desenvolvimento deste trabalho, meu respeito e admiração.

A minha família, em especial a minha filha *Marina*, por ter sido um divisor de águas na minha vida, aos meus pais *Mario Luis* e *Simone*, pela educação que me proporcionaram, e aos meus avós *Anibal* e *Maria Rosa*, pelo apoio e incentivo de sempre, minha gratidão e meu amor.

Aos Cientistas da Computação *Edison Hund Lucas*, *Leonardo de Lima Corrêa* e *Mikael Poetsch*, pelas incontáveis linhas de código programadas, pela dedicação e paciência, muito obrigada.

Aos colegas do Laboratório de Hidrologia e Modelagem Hidrológica, *Alice*, *Cristian*, *Daiana*, *Diego*, *Eduardo*, *Gilvan*, *Laura*, *Léo*, *Maíra*, *Marcelle*, *Rodolfo* e *Zandra*, pela equipe nota mil que formamos, muito obrigada.

Aos demais *professores* do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, em especial ao *Prof. Dr. Lessandro Coll Faria* e ao *Prof. Dr. Luis Carlos Timm*, por terem contribuído de forma significativa para o meu crescimento profissional e pessoal, muito obrigada.

A *Universidade Federal de Pelotas*, mais especificamente ao *Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos* e ao *Curso de Graduação em Engenharia Hídrica*, por terem proporcionado a minha formação acadêmica.

A *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul*, pela concessão de bolsa de pesquisa.

A Deus, por me permitir agradecê-los neste momento.

*“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre
ombros de gigantes.”
(Isaac Newton)*

Resumo

CALDEIRA, Tamara Leitzke. **Aprimoramento computacional do modelo Lavras Simulation of Hydrology (LASH): aplicação em duas bacias do Rio Grande do Sul**. 2016. 213f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

A modelagem hidrológica em bacias hidrográficas consiste numa das principais e mais modernas ferramentas para gestão de recursos hídricos e dimensionamentos hidrológicos, no entanto, muitos modelos demandam um grande número de informações temporais e espaciais, o que muitas vezes impede que sejam aplicados, principalmente em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, onde é mais observado o monitoramento de bacias de grande porte. Frente a este fato, em 2008 uma equipe de pesquisadores da Universidade Federal de Lavras, em parceria com a Universidade de Purdue (EUA), deram início ao desenvolvimento de um modelo hidrológico conceitual voltado à bacias com limitações na base de dados; em 2008 surgia a primeira versão deste modelo e, em 2009, a segunda, quando passaria a ser chamado de *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH). O modelo LASH passou por aprimoramentos computacionais entre o desenvolvimento da primeira e da segunda versão, contudo, não apresentava-se “amigável” para suprir a demanda por parte de profissionais fora do ambiente acadêmico. Foi então que surgiu a ideia de desenvolver sua terceira versão, contando agora também com a parceria da Universidade Federal de Pelotas. O objetivo deste trabalho foi desenvolver e apresentar a terceira versão do modelo LASH, contemplando módulos auxiliares, inúmeros aprimoramentos computacionais e a adaptação da rotina hidrológica e de calibração automática para modelagem com discretização espacial por sub-bacias hidrográficas, bem como avaliar a aplicabilidade desta versão à duas bacias hidrográficas localizadas no sul do Rio Grande do Sul, sob duas estratégias distintas de calibração. Os resultados obtidos apontam para um enorme avanço computacional: i) o módulo para processamento da base de dados temporal (SYHDA) tomou grandes proporções durante seu desenvolvimento, ao ponto de ter sido registrado junto ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) e vir sendo empregado de forma isolada ao modelo, como uma importante ferramenta de análises hidrológicas; ii) o módulo de processamento da base dados espaciais se mostrou bastante eficiente e, neste momento, encontra-se sob aguardo de deferimento de registro junto ao INPI iii) os módulos de banco de dados, integração e calibração automática se mostraram indispensáveis frente às funcionalidades que lhes foram atribuídas; e iv) o tempo de processamento foi bastante inferior quando comparado à segunda versão. Do ponto de vista hidrológico, a análise do desempenho da terceira versão do LASH frente à calibração e validação para as bacias analisadas indica que o modelo foi capaz de capturar o comportamento geral das vazões observadas, no entanto, a representatividade espacial dos processos hidrológicos é menor quando comparada à segunda versão. No que

tange à calibração, as estratégias empregadas apresentaram resultados distintos, assim como as funções objetivo, tendo sido o modelo mais eficiente quando todos parâmetros foram calibrados de forma concentrada. Esta constatação dá indícios de que a estrutura do módulo de calibração automático precisa ser melhor avaliada e de que deve-se analisar a possibilidade de empregar métodos de calibração multiobjetivo, os quais são mais aconselháveis, segundo a literatura, quando objetiva-se a utilização do modelo em ambientes não acadêmicos.

Palavras-chave: MODELAGEM HIDROLÓGICA; BACIA HIDROGRÁFICA; SIG; CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA, GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Abstract

CALDEIRA, Tamara Leitzke. **Computational enhancement of the Lavras Simulation of Hydrology (LASH): application in two watersheds situated in the Rio Grande do Sul State**. 2016. 213 p. Dissertation (Master's Degree in Water Resources) – Graduate Program in Water Resources, Center of Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2016.

Hydrological watershed modeling is considered one of the main and most modern tools for water resources management and hydrological designs; however, many models require a large amount of temporal and spatial information. This commonly makes it difficult their application, especially in Brazil and in other developing countries, where hydrological monitoring has been predominantly observed for large watersheds. In 2008, a research team from Federal University of Lavras in collaboration with Purdue University (USA) began the development of a conceptual hydrological model intended for data-scarce watersheds. The researchers finished the first version of such model in 2008 and, its second version in 2009, which was known as Lavras Simulation of Hydrology (LASH). The second version of LASH model had many computational refinements in relation to its first version; nevertheless, it does not have a friendly integrated development environment (IDE) to fulfil the needs of non-academic professionals. Then, the research team decided to develop its third version, having collaboration with Federal University of Pelotas. The objectives of this study were to: i) develop and present the third version of the LASH model, addressing auxiliary modules, countless computational enhancements and adaptation of hydrological and automatic calibration routines for modeling with spatial discretization of subwatersheds; and ii) evaluate the applicability of this version to two watersheds situated in the southern Rio Grande do Sul State, considering two calibration schemes. The results found in this study indicated a considerable computational upgrade: i) the module designed for processing of temporal data bases (SYHDA) has been frequently used in many applications as an independent software since its development, such that it was protected by copyright (Instituto de Propriedade Industrial – INPI); ii) the module for processing of spatial data bases was considered efficient and also protected by copyright (INPI); iii) the modules of database, integration and automatic calibration were indispensable considering their designed functionalities; and iv) the time of processing was undoubtedly less than that spent by the second version. Under the hydrological point of view, the performance analysis of the third version of LASH, with respect to calibration and validation of the studied watersheds, indicated that the model was able to capture the overall behavior of the observed hydrograph; however, it should be mentioned that the spatial representativeness of the hydrological processes is inferior when compared to that existing in the second version. Relative to calibration, the used schemes and objective functions presented somewhat contrasting results; the most efficient scheme was that in which all the calibration parameters were lumped. This finding suggests that the framework of the automatic calibration

module needs to be better evaluated and that there might be the necessity to implement multi-objective calibration algorithms, which have drawn attention in scientific community, when the goal is the model application for non-academic purposes.

Key-words: HYDROLOGICAL MODELING; WATERSHED; GIS; AUTOMATIC CALIBRATION, WATER RESOURCES MANAGEMENT

Lista De Figuras

Figura 1 - Representação do ciclo hidrológico em escala global.....	6
Figura 2 - Linha do tempo do desenvolvimento dos modelos hidrológicos, representado alguns estudos realizados desde o século XIX até o desenvolvimento da segunda versão do modelo <i>Lavras Simulation of Hydrology</i> (LASH).....	21
Figura 3 - Interface da primeira versão do modelo hidrológico, em planilha eletrônica <i>Microsoft Office Excel</i> , desenvolvida por Viola (2008)	29
Figura 4 - Interface da segunda versão do modelo hidrológico, o <i>Lavras Simulation of Hydrology</i> (LASH), desenvolvida por Beskow (2009).....	30
Figura 5 - Etapas da simulação na segunda versão do modelo hidrológico LASH	31
Figura 6 - Modelo hidrológico LASH da concepção e avaliação ao desenvolvimento da terceira versão	35
Figura 7 - Organograma representando os principais aprimoramentos da terceira versão do modelo hidrológico LASH	36
Figura 8 - Comportamento do fator K_S em função do armazenamento atual de água no solo e das equações 37 e 38.....	45
Figura 9 - Portal HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas, um dos principais bancos de dados hidrológicos do Brasil	51
Figura 10 - Arquivo de texto (*.txt) padrão para dados de chuva, obtido junto ao HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (ANA).....	52
Figura 11 - Arquivo <i>Microsoft DataBase</i> (*.MDB) padrão para dados de chuva, obtido junto ao HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (ANA).....	52
Figura 12 - Portal do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), um dos principais bancos de dados meteorológicos do Brasil	53
Figura 13 - Arquivo de texto (*.txt) padrão para dados de chuva, obtido junto ao Banco de Dados de Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMet).....	54

Figura 14 - Fluxograma de inicialização do <i>System of Hydrological Data Acquisition and Analysis</i> (SYHDA)	55
Figura 15 - Fluxograma dos módulos de gráficos e estatísticas básicas do <i>System of Hydrological Data Acquisition and Analysis</i> (SYHDA).....	57
Figura 16 - Ideia central do desenvolvimento do <i>System of Hydrological Data Acquisition and Analysis</i> (SYHDA).....	58
Figura 17 - Fluxograma apresentando a estrutura do módulo de processamento automático da base de dados espaciais “ArcLASH”	62
Figura 18 - Idealização central do módulo de processamento automático da base de dados espaciais “ArcLASH”.....	64
Figura 19 - Arquivo *.txt representando o mapa de sub-bacias hidrográficas da BHAF.....	66
Figura 20 - Arquivo *.txt de estações pluviométricas, contendo informações que serão importadas pelo modelo LASH através do módulo de integração	67
Figura 21 - Fluxograma do algoritmo SCE-UA acoplado ao modelo LASH para calibração automática de parâmetros desconhecidos.....	69
Figura 22 - Interface do módulo de processamento da base de dados temporal “SYHDA”.....	72
Figura 23 - Interface inicial de visualização da série histórica no ambiente do SYHDA.....	72
Figura 24 - Interface de visualização das séries organizadas pelo SYHDA.....	73
Figura 25 - Interface do SYHDA para cálculo de estatísticas básicas.....	75
Figura 26 - interface do SYHDA para geração do histograma de frequência.....	76
Figura 27 - Interface do SYHDA para curva de permanência, exibindo o menu <i>Analysis(a)</i> , <i>Graphic (b)</i> e <i>Table (c)</i>	77
Figura 28 - Sítio eletrônico do INPI, exibindo informações a respeito do registro do software SYHDA	80
Figura 29 - Interface da ferramenta ArcLASH, destacando sua localização no ambiente do SIG ArcGIS.....	81
Figura 30 - Organização dos resultados gerados pelo ArcLASH para a BHAF-PC em pasta e subpastas criadas pela ferramenta, destacando as sub-bacias hidrográfica.....	84

Figura 31 - Tabela de atributos da seção de controle (outlet) da BHAF-PC, visualizada no ambiente do SIG ArcGIS	85
Figura 32 - Tabela de atributos das estações de monitoramento pluviométrico consideradas para análise da BHAF-PC, visualizada no ambiente do SIG ArcGIS	86
Figura 33 - Tabela de atributos das estações de monitoramento meteorológico consideradas para análise da BHAF-PC, visualizada no ambiente do SIG ArcGIS	86
Figura 34 - Tabela de atributos das sub-bacias hidrográficas obtidas pelo processamento da base de dados gerais e configurações iniciais, para a BHAF-PC	87
Figura 35 - Base de dados espaciais gerada pelo ArcLASH para a BHAF-PCF...	88
Figura 36 - Base de dados espaciais gerado pelo ArcLASH para a BHAF-PC	89
Figura 37 - Sítio eletrônico do INPI, exibindo informações a respeito do pedido de registro do software ArcLASH	91
Figura 38 - Interface do modelo hidrológico LASH para cadastramento e exibição de estações pluviométricas, meteorológicas e fluviométricas cadastradas.....	92
Figura 39 - Interface do modelo hidrológico LASH para importação e visualização de série histórica de dados pluviométricos.....	93
Figura 40 - Interface do modelo hidrológico LASH para importação e visualização de série histórica de dados meteorológicos	94
Figura 41 - Interface do modelo hidrológico LASH para importação e visualização de série histórica de dados fluviométricos.....	94
Figura 42 - Interface do modelo hidrológico LASH para cadastramento de usos do solo.....	95
Figura 43 - Interface do modelo hidrológico LASH para cadastramento de variáveis atreladas ao uso do solo	96
Figura 44 - Interface do modelo hidrológico LASH para cadastramento de classes de solo e de variáveis atreladas a estas classes.....	97
Figura 45 - Interface de importação da base de dados espaciais processada pelo ArcLASH.....	98

Figura 46 - Interface de visualização da tabela de atributos das estações meteorológicas que compõem a base de dados espaciais processada através do ArcLASH.....	99
Figura 47 - Interface de visualização da tabela de atributos das estações pluviométricas que compõem a base de dados espaciais processada através do ArcLASH.....	100
Figura 48 - Interface de visualização da tabela de atributos da seção de controle que compõem a base de dados espaciais processada através do ArcLASH	100
Figura 49 - Interface de visualização da tabela de atributos das sub-bacias hidrográficas que compõem a base de dados espaciais processada através do ArcLASH.....	101
Figura 50 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa do Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente	103
Figura 51 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de declividade do terreno	104
Figura 52 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de direção de fluxo	104
Figura 53 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de acúmulo de fluxo	105
Figura 54 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de rede de drenagem	105
Figura 55 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de sub-bacias hidrográficas.....	106
Figura 56 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de polígonos de Thiessen das estações pluviométricas.....	106
Figura 57 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de polígonos de Thiessen das estações meteorológicas	107
Figura 58 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de classes de uso do solo	107
Figura 59 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de classes de solo	108
Figura 60 - Interface do modelo LASH para compilação de características fisiográficas das sub-bacias	109

Figura 61 - Interface do modelo LASH para compilação de variáveis atreladas às classes de uso do solo, para cada sub-bacia hidrográfica	110
Figura 62 - Interface do modelo LASH para compilação de variáveis atreladas às classes de solo, para cada sub-bacia hidrográfica.....	110
Figura 63 - Interface do modelo LASH para compilação de áreas de influência das estações pluviométricas considerando a metodologia dos polígonos de Thiessen	111
Figura 64 - Interface do modelo LASH para compilação de áreas de influência das estações meteorológicas considerando a metodologia dos polígonos de Thiessen	112
Figura 65 - Interface para seleção dos parâmetros a serem calibrados.....	113
Figura 66 - Interface para configuração do algoritmo de calibração automática SCE-UA.....	114
Figura 67 - Interface do modelo hidrológico LASH para configuração da etapa de calibração	115
Figura 68 - Estados brasileiros e cursos d'água onde o modelo LASH já foi empregado com sucesso para modelagem e simulação hidrológica em bacias hidrográficas com carência de dados.....	119
Figura 69 - Localização das áreas de estudo no Brasil (a), no Rio Grande do Sul (b) e na região (c).....	123
Figura 70 - Localização as estações empregadas em relação à área de estudo	127
Figura 71 – Modelo Digital de Elevação (MDE) empregado para processar as bases de dados espaciais da BHAP e da BHAF através do ArcLASH.....	129
Figura 72 - Mapa de solos empregado para processar as bases de dados espaciais da BHAP e da BHAF através do ArcLASH.....	130
Figura 73 - Mapa de uso do solo empregado para processar as bases de dados espaciais da BHAP e da BHAF através do ArcLASH.....	131
Figura 74 - Mapa de estações pluviométricas empregado para processar as bases de dados espaciais da BHAP e da BHAF através do ArcLASH	132
Figura 75 - Mapa de estações meteorológicas empregado para processar as bases de dados espaciais da BHAP e da BHAF	132
Figura 76 - Mapa da seção de controle empregada para processar as bases de dados espaciais da BHAP-PCF.....	133

Figura 77 - Mapa da seção de controle empregada para processar as bases de dados espaciais da BHAF-PC	133
Figura 78 - Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDE-HC) para a área de estudo	135
Figura 79 - Mapa de declividade do terreno para a área de estudo	136
Figura 80 - Mapa de sub-bacias hidrográficas e rede de drenagem numérica para a área de estudo	137
Figura 81 - Mapa de classes de solo para a área de estudo, adaptado do mapa original de Brasil (1973) para o estado do Rio Grande do Sul	138
Figura 82 - Distribuição espacial das classes de uso do solo identificadas na área de estudo através da interpretação de imagem de satélite	140
Figura 83 - Convergência dos parâmetros de calibração da terceira versão do modelo LASH para a BHAP-PCF, empregando a EC-1, o algoritmo de calibração automática SCE-UA e três diferentes funções objetivo	150
Figura 84 - Convergência dos parâmetros de calibração da terceira versão do modelo LASH para a BHAP-PCF, empregando a EC-2, o algoritmo de calibração automática SCE-UA e três diferentes funções objetivo	151
Figura 85 - Convergência dos parâmetros de calibração da terceira versão do modelo LASH para a BHAF-PC, empregando a EC-1, o algoritmo de calibração automática SCE-UA e três diferentes funções objetivo	152
Figura 86 - Convergência dos parâmetros de calibração da terceira versão do modelo LASH para a BHAF-PC, empregando a EC-2, o algoritmo de calibração automática SCE-UA e três diferentes funções objetivo	153
Figura 87 - Pluviogramas médios observados na BHAP-PCF, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-1 e o intervalo de tempo diário.....	159
Figura 88 - Pluviogramas médios observados na BHAF-PC, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-1 e o intervalo de tempo diário.....	160

Figura 89 - Vazões mínimas, médias e máximas anuais observadas e estimadas, para a BHAP-PCF, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-1	165
Figura 90 - Vazões mínimas, médias e máximas anuais observadas e estimadas, para a BHAF-PC, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-1	166
Figura 91 - Curvas de permanência de vazões médias diárias observada e estimada, para a BHAP-PCF, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-1.....	168
Figura 92 - Curvas de permanência de vazões médias diárias observada e estimada, para a BHAF-PC, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-1.....	168
Figura 93 - Divisão percentual dos componentes do escoamento – escoamento de base, subsuperficial e superficial – ao longo dos anos empregados para calibração e validação, considerando as vazões médias diárias estimadas, para a BHAP-PCF, a partir da terceira versão do modelo LASH e da EC-1	171
Figura 94 - Divisão percentual dos componentes do escoamento – escoamento de base, subsuperficial e superficial – ao longo dos anos empregados para calibração e validação, considerando as vazões médias diárias estimadas, para a BHAF-PC, a partir da terceira versão do modelo LASH e da EC-1	172
Figura 95 - Pluviogramas médios observados na BHAP-PCF, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-1 e o intervalo de tempo mensal.....	175
Figura 96 - Pluviogramas médios observados na BHAF-PC, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-1 e o intervalo de tempo mensal.....	176
Figura 97 - Pluviogramas médios observados na BHAP-PCF, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-2 e o intervalo de tempo diário.....	178

Figura 98 – Pluviogramas médios observados na BHAF-PC, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-2 e o intervalo de tempo diário.....	179
Figura 99 - Vazões mínimas, médias e máximas anuais observadas e estimadas, para a BHAF-PCF, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-2	182
Figura 100 - Vazões mínimas, médias e máximas anuais observadas e estimadas, para a BHAF-PC, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-2.....	183
Figura 101 - Desempenho das estratégias de calibração EC-1 e EC-2 na estimativa de indicadores anuais na BHAF-PCF e na BHAF-PC, através da análise da estatística ΔQ entre dados observados e estimados	184
Figura 102 - Curvas de permanência de vazões médias diárias observada e estimada, para a BHAF-PCF, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-2.....	185
Figura 103 - Curvas de permanência de vazões médias diárias observada e estimada, para a BHAF-PC, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-2.....	185
Figura 104 - Divisão percentual dos componentes do escoamento – escoamento de base, subsuperficial e superficial – ao longo dos anos empregados para calibração e validação, considerando as vazões médias diárias estimadas, para a BHAF-PCF, a partir da terceira versão do modelo LASH e da EC-2	188
Figura 105 - Divisão percentual dos componentes do escoamento – escoamento de base, subsuperficial e superficial – ao longo dos anos empregados para calibração e validação, considerando as vazões médias diárias estimadas, para a BHAF-PC, a partir da terceira versão do modelo LASH e da EC-2.....	189
Figura 106 - Pluviogramas médios observados na BHAF-PCF, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-2 e o intervalo de tempo mensal.....	190
Figura 107 - Pluviogramas médios observados na BHAF-PC, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira	

versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-2 e o intervalo de tempo mensal191

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Estudos envolvendo a calibração de modelos hidrológicos chuva-vazão e o período de dados empregados para tal finalidade	18
Tabela 2 - Variáveis meteorológicas médias observadas entre 1971 e 2000 na Estação Agroclimatológica de Pelotas, localizada no município de Capão do Leão	124
Tabela 3 - Caracterização das estações de monitoramento meteorológico, pluviométrico e fluviométrico empregadas neste estudo	126
Tabela 4 - Umidade do solo no ponto de saturação (θ_s), umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e profundidade do solo (Z) das classes identificadas na BHAP-PCF	139
Tabela 5 - Umidade do solo no ponto de saturação (θ_s), umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e profundidade do solo (Z) das classes identificadas na BHAF-PC.....	139
Tabela 6 - Área relativa percentual da BHAP-PCF e da BHAF-PC ocupada pelas classes de uso do solo	142
Tabela 7 - Valores empregados para quantificar as variáveis atreladas aos usos do solo identificados na área de estudo e referência bibliográfica consultada....	143
Tabela 8 - Parâmetros calibrados e limiar estabelecido para tal finalidade.....	145
Tabela 9 - Parâmetros calibrados no modelo LASH para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC.....	155
Tabela 10 - Valores de C_B para diferentes períodos de recessão.....	158
Tabela 11 - Medidas estatísticas para avaliação do desempenho da terceira versão do modelo hidrológico LASH frente aos períodos de calibração e validação, para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC, obtidas através da EC-1	161
Tabela 12 - Vazões de referência, obtidas a partir das curvas de permanência de vazões médias diárias observa e estimada empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-1, e a medida estatística ΔQ , indicando se houve super ou subestimativa desses indicadores e suas magnitudes	169
Tabela 13 - Medidas estatísticas para avaliação do desempenho da terceira versão do modelo hidrológico LASH frente aos períodos de calibração e	

validação, para uma análise de vazões médias mensais, obtidas através da EC-1	177
Tabela 14 - Medidas estatísticas para avaliação do desempenho da terceira versão do modelo hidrológico LASH frente aos períodos de calibração e validação, para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC, obtidas através da EC-2.....	180
Tabela 15 - Vazões de referência, obtidas a partir das curvas de permanência de vazões médias diárias observada e estimada empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-2, e a medida estatística ΔQ , indicando se houve super ou subestimativa desses indicadores e suas magnitudes	186
Tabela 16 - Medidas estatísticas para avaliação do desempenho da terceira versão do modelo hidrológico LASH frente aos períodos de calibração e validação, para uma análise de vazões médias mensais, obtidas através da EC-2	191

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGNPS	Agricultural Non Point Source Pollution
ANA	Agência Nacional de Águas
ANSWER	Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
BHAF	Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata
BHAF-PC	Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata até a seção de controle Passo dos Carros
BHAP	Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas
BHAP-PCF	Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas até a seção de controle Ponte Cordeiro de Farias
CLSM	Catchment Land Surface Model
CN	Curva-Número
CPACT	Centro de Pesquisa Agropecuária Clima Temperado
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DHSVM	Distributed Hydrology Soil Vegetation Model
EC-1	Estratégia de calibração 1
EC-2	Estratégia de calibração 2
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENVI	Environment for Visualizing Imagens
ETA	Estação de Tratamento de Água

GCM	General Circulation Model
GPS	Sistema de Posicionamento Global
HEC-1	Hydrologic Engineering Center 1 – Flood Hydrograph Package
HEC-HMS	Hydrological Modelling System
HL-RMS	Hydrology Laboratory Research Modeling System
IA	Inteligência Artificial
IAF	Índice de Área Foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE	Integrated Development Environment
INMet	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
LASH	Lavras Simulation of Hydrology
LISEM	Llmburg Soil Erosion Model
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDE-HC	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
MGB-IPH	Modelo de Grandes Bacias – Instituto de Pesquisas Hidráulicas
NBR	Norma Brasileira
PMP	Ponto de murcha permanente
SANEP	Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas
SCS	Soil Conservation Service
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SCE-UA	Shuffled Complex Evolution

SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure
SSARR	Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation Model
SYHDA	System of Hydrological Data Acquisition and Analysis
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWM	Stanford Watershed Model
TOPMODEL	Topography Based Hydrological Model
WASIM	Water balance Simulation Model
WEPP	Water Erosion Prediction Project

Lista de Símbolos

A_{chuvoso}	Períodos chuvosos na bacia A
A_{seco}	Períodos secos na bacia A
B_{chuvoso}	Períodos chuvosos na bacia B
B_{seco}	Períodos secos na bacia B
C_{NS}	Coeficiente de Nash e Sutcliffe
R^2	Coeficiente de determinação
Δv	Relação entre volumes medidos e calculados
ΔA	Varição de armazenamento de água no solo
P	Precipitação média
D_{CR}	Ascensão capilar
ET_{R}	Evapotranspiração real
D_{B}	Lâmina de escoamento subterrâneo
D_{SS}	Lâmina de escoamento subsuperficial
D_{SUP}	Lâmina de escoamento superficial
Δt	Intervalo de tempo de 1 dia
A_t	Armazenamento atual de água no solo
A_{t-1}	Armazenamento de água no solo no intervalo de tempo imediatamente anterior à t
A_m	Capacidade de armazenamento de água no solo
CRI	Capacidade do Reservatório de Interceptação
IAF	Índice de área foliar
α	Capacidade máxima de armazenamento de água por unidade de área das folhas
Ll_{t-1}	Lâmina no reservatório de interceptação ao início do intervalo de tempo

P_t	Precipitação total
Ll_t	Lâmina interceptada durante o intervalo de tempo
ET_P	Evapotranspiração potencial
I_a	Abstração inicial
M	Umidade antecedente
S	Armazenamento potencial de água no solo compreendido entre o conteúdo de água no solo no ponto de saturação
θ_S	Conteúdo de água no solo no ponto de saturação
θ_{PMP}	Conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente
θ_A	Conteúdo atual de água no solo
K_{SS}	Parâmetro do escoamento subsuperficial (mm)
Pr	Índice de porosidade do solo
A_{cc}	Armazenamento de água no solo a partir do qual ocorre escoamento subsuperficial
A_c	Limiar de armazenamento a partir do qual ocorre geração de escoamento subterrâneo
D_B	Escoamento subterrâneo
K_B	Parâmetro do escoamento subterrâneo
ET_C	Evapotranspiração da cultura
Δ	Declividade da curva de pressão de saturação da água
T	Temperatura do ar
R_n	Radiação líquida
R_{ns}	Radiação de ondas curtas
R_{nl}	Radiação de ondas longas
a	Albedo

R_s	Radiação solar
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
$T_{m\acute{a}x,K}$	Temperatura máxima na escala Kelvin
$T_{m\acute{i}n,K}$	Temperatura mínima na escala Kelvin
e_a	Pressão atual do vapor d'gua
R_{so}	Radiao de ondas curtas que ocorre quando não há nuvens no céu
e_s	Pressão de saturao do vapor d'gua
UR	Umidade relativa
$T_{m\acute{i}n}$	Temperatura mínima em graus Celsius
$T_{m\acute{a}x}$	Temperatura máxima em graus Celsius
z	Altitude
R_a	Radiao que atinge o topo da atmosfera
G_{sc}	Constante solar
d_r	Distância relativa inversa Terra-Sol
ω_s	ângulo horário ao pão do sol
φ	Latitude
δ	Declinao solar
J	Número do dia no calendário Juliano
G	Fluxo de energia para o solo
γ	Constante psicrométrica
P	Pressão atmosférica
ϵ	razão do peso molecular do vapor d'água/ar seco
T_{Kv}	Temperatura virtual na escala Kelvin

R	Constante de gás específico
r_a	Resistência aerodinâmica
h	Altura da vegetação
U_{10}	Velocidade do vento a 10 m da superfície
v	Velocidade do vento média diária
v_{emp}	Velocidade do vento empregada
$h_{estação}$	Altura da estação meteorológica
r_s	Resistência estomatal
ET_R	Evapotranspiração real
K_S	Coeficiente de umidade do solo
A_L	Armazenamento de água no solo limite a partir do qual ocorre decréscimo da evapotranspiração
A_{PMP}	Armazenamento de água no solo no ponto de murcha permanente
Q_{SUP}	Vazão de saída do reservatório superficial
Q_{SS}	Vazão de saída do reservatório subsuperficial
Q_B	Vazão de saída do reservatório subterrâneo
$A_{sub-bacia}$	Área de drenagem de cada da sub-bacia
V_{SUP}	Volume no reservatório superficial
V_{SS}	Volume no reservatório subsuperficial
V_B	Volume no reservatório subterrâneo
T_c	Tempo de concentração
C_{SUP}	Parâmetro referente à propagação do reservatório superficial
C_{SS}	Parâmetro referente à propagação do reservatório subsuperficial

C_B	Parâmetro referente à propagação do reservatório subterrâneo
L	Comprimento do curso d'água principal da sub-bacia
H	Desnível do ponto mais remoto do curso d'água principal em relação ao exutório da sub-bacia
Q_S	Vazão de saída do trecho de propagação
Q_e	Vazão de entrada no trecho
C_1, C_2, C_3	Constantes de propagação
Δt	Passo da simulação
K	Parâmetro de tempo do modelo Muskingum-Cunge Linear
X	Parâmetro de espaço do modelo Muskingum-Cunge Linear
Q_0	Vazão de referência
B_0	Largura do trecho de propagação
Δx	Comprimento do trecho de propagação
S_0	Declividade do canal
c_0	Celeridade cinemática
n	Coefficiente de rugosidade de Manning
®	Marca registrada
*.txt	Extensão de arquivo de texto
*.MDB	Extensão de arquivo Microsoft DataBase
*.xls	Extensão de arquivo Microsoft Office Excel
$Q_{7,10}$	Vazão mínima média de 7 dias com tempo de retorno de 10 anos
Q_{90}	Vazão que é igualada ou excedida em 90% do tempo
X, Y	Coordenadas de localização (m)

λ	Coeficiente de abstração inicial
K_B	Condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo
K_{SS}	Condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial
K_{CAP}	Densidade de fluxo máxima de retorno por ascensão capilar
RMSE	Raíz quadrada do erro médio
$C_{NS} \log(Q)$	Coeficiente de Nash-Sutcliffe na versão para valores logaritmizados
Q_{obst}	Vazão observada no tempo $t=i$
Q_{estt}	Vazão estimado no tempo $t=i$
\bar{Q}_{obs}	Vazão média observada
N	Número de ordenadas do hidrograma
ΔQ	Erro relativo da estimativa de vazões
$Q_{10\%}$	Vazão que é igualada ou excedida em 10% do tempo
$Q_{20\%}$	Vazão que é igualada ou excedida em 20% do tempo
$Q_{30\%}$	Vazão que é igualada ou excedida em 30% do tempo
$Q_{40\%}$	Vazão que é igualada ou excedida em 40% do tempo
$Q_{50\%}$	Vazão que é igualada ou excedida em 50% do tempo
$Q_{60\%}$	Vazão que é igualada ou excedida em 60% do tempo
$Q_{70\%}$	Vazão que é igualada ou excedida em 70% do tempo
$Q_{80\%}$	Vazão que é igualada ou excedida em 80% do tempo
$Q_{95\%}$	Vazão que é igualada ou excedida em 95% do tempo

Sumário

1	Introdução	1
1.1.	Objetivo geral	2
1.2.	Objetivos específicos.....	2
1.3.	Hipóteses	3
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1.	Hidrologia e ciclo hidrológico.....	4
2.2.	Modelagem hidrológica	11
2.2.1.	Definições.....	11
2.2.2.	Classificação de modelos hidrológicos.....	11
2.2.3.	Etapas da modelagem hidrológica	13
2.3.	Desenvolvimento dos modelos hidrológicos.....	21
	Capítulo 1 – Modelo hidrológico Lavras Simulation of Hydrology (LASH): da concepção ao desenvolvimento da terceira versão.....	28
1	Introdução	28
2	Material e Métodos.....	37
2.1.	Adequação da rotina hidrológica	37
2.1.1.	Balanço hídrico do solo	37
2.1.2.	Interceptação.....	38
2.1.3.	Geração de escoamento superficial direto	39
2.1.4.	Geração de escoamento subsuperficial	40
2.1.5.	Geração de escoamento subterrâneo	41
2.1.6.	Evapotranspiração.....	41
2.1.7.	Propagação nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo	46
2.1.1.	Propagação nos canais	47

2.2.	System of Hydrological Data Acquisition and Analysis (SYHDA)	49
2.3.	ArcLASH.....	58
2.4.	Módulo de banco de dados	64
2.5.	Módulo de integração	65
2.6.	Módulo de calibração automática	68
3	Resultados e Discussão.....	71
3.1.	SYHDA	71
3.2.	ArcLASH.....	80
3.3.	Módulo de banco de dados	91
3.4.	Módulo de integração	98
3.5.	Módulo de calibração automática	112
4	Conclusões	116

Capítulo 2 – Aplicabilidade da terceira versão do modelo Lavras Simulation of Hydrology (LASH): estudo de caso nas bacias hidrográficas dos arroios Pelotas e Fragata, extremo sul do Brasil..... 118

1	Introdução	118
2	Material e Métodos.....	121
2.1.	Bacias hidrográficas analisadas	121
2.1.1.	Contextualização e relevância da área de estudo.....	121
2.1.2.	Base de dados hidrológicos e climáticos.....	125
2.1.3.	Estabelecimento da base de dados espaciais	128
2.1.3.1.	Características fisiográficas	134
2.1.3.2.	Base de dados de solos	137
2.1.3.3.	Base de dados de usos do solo	140
2.2.	Calibração e Validação do modelo LASH.....	144
3	Resultados e Discussão.....	149
3.1.	Estimativa e comportamento dos parâmetros de calibração ...	149

3.2.	Análise da precisão do modelo pela EC-1.....	159
3.3.	Análise da precisão do modelo pela EC-2.....	177
4	Conclusões	193
3	Considerações Finais.....	194
	REFERÊNCIAS.....	196

1 Introdução

A água é um recurso natural de valor inestimável, indispensável à vida e estratégica como insumo ao desenvolvimento econômico de uma região. No entanto, o demasiado crescimento populacional tem alarmado diferentes esferas da sociedade no que tange à sua oferta em quantidade e qualidade. Frente a este cenário e considerando a disponibilidade hídrica variável no tempo e no espaço, o monitoramento hidrológico passa a ser fundamental, possibilitando o melhor gerenciamento dos recursos hídricos.

No Brasil, a rede hidrométrica básica, cuja responsável é a Agência Nacional de Águas (ANA), geralmente contempla bacias hidrográficas de médio a grande portes, haja vista que nelas ocorrem os principais aproveitamentos hídricos. Pequenas bacias hidrográficas notoriamente são pouco monitoradas e comumente os técnicos se deparam com ausência de dados no local de interesse, fato que nas últimas décadas vem impulsionando o desenvolvimento de modelos hidrológicos como subsidio técnico à gestão da água.

Um deles é o modelo hidrológico “Lavras Simulation of Hydrology” (LASH), o qual pode ser aplicado para simular variáveis representativas de processos hidrológicos, difíceis de serem mensuradas em bacias hidrográficas sem monitoramento, como evapotranspiração, interceptação, ascensão capilar, disponibilidade da água no solo, escoamento superficial direto, escoamento subsuperficial e escoamento de base. De acordo com Beskow *et al.* (2009b), muitos modelos hidrológicos são complexos para serem empregados em áreas com base de dados limitadas. Neste sentido, Beskow, Mello e Norton (2011) destacam o LASH, relatando a aplicabilidade de modelos hidrológicos com abordagem simplificada, requerendo um menor número de informações.

O modelo LASH teve suas primeira e segunda versões desenvolvidas na Universidade Federal de Lavras, em parceria com o National Soil Erosion Research Laboratory – Purdue University, por Viola (2008) e Beskow (2009); a primeira versão consiste em uma complexa planilha eletrônica, cuja calibração dos parâmetros pode ser feita de forma manual ou empregando a ferramenta Solver do *Microsoft Office Excel*, enquanto que a segunda versão foi desenvolvida como programa de computador, contemplando um algoritmo de calibração

automática de parâmetros. Todavia, tanto a primeira quanto a segunda versões não possuem interfaces “amigáveis”, passíveis de serem empregadas em ambientes não acadêmicos.

Com o intuito de ampliar e tornar mais realística sua aplicação, do ponto de vista hidrológico, bem como de suprir a demanda atual por parte de profissionais em recursos hídricos que atuam em empresas, instituições governamentais, associações de usuários de água e comitês de bacia, a equipe de pesquisadores que desenvolvem o LASH idealizou sua terceira versão.

1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo concerne à apresentação e à avaliação de desempenho da terceira versão do modelo hidrológico LASH.

1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- i) criar uma interface para um banco de dados hidrometeorológicos, de solos e usos de solo;
- ii) desenvolver um módulo de aquisição e análise de séries de precipitação e de vazão;
- iii) desenvolver um módulo, em ambiente de Sistema de Informações Geográficas, para elaborar o banco de dados espaciais de forma automática;
- iv) desenvolver um módulo para integrar mapas ao banco de dados de solo e de usos do solo;
- v) adaptar os algoritmos desenvolvidos na segunda versão, os quais pressupõem a divisão da bacia hidrográfica em células, para simular os processos hidrológicos considerando a discretização espacial por sub-bacia hidrográfica, permitir a consideração de mais de uma estação pluviométrica e meteorológica na análise e permitir a consideração da variabilidade temporal de variáveis associadas aos usos do solo

- vi) desenvolver um módulo e adaptar a rotina de calibração automática de parâmetros por sub-bacia hidrográfica;
- vii) desenvolver um módulo para armazenamento dos resultados da simulação hidrológica; e
- viii) avaliar o desempenho da terceira versão do modelo LASH com base nos dados da bacia hidrográfica do Arroio Pelotas (BHAP) e da bacia hidrográfica do Arroio Fragata (BHAF).

1.3. Hipóteses

- i. Os aprimoramentos computacionais do modelo hidrológico LASH, facilitarão a compilação de informações espaciais e temporais, a integração destas com o ambiente do modelo e o armazenamento em bancos de dados, limitando a inserção de erros por parte do usuário e agilizando a tarefa de modelagem hidrológica;
- ii. O algoritmo de calibração automática empregado na segunda versão do modelo LASH apresentará desempenho satisfatório quando da utilização na terceira versão;
- iii. A possibilidade de considerar mais de uma estação pluviométrica e meteorológica permitirá melhorar a representatividade espacial dos dados de entrada;
- iv. A discretização espacial por sub-bacias (terceira versão) reduzirá a representatividade dos processos hidrológicos quando comparada à discretização por células (segunda versão);
- v. A calibração de parâmetros de forma distribuída por sub-bacias hidrográficas apresentará vantagens sobre a calibração concentrada; e
- vi. A formulação teórica dos processos hidrológicos, considerada pelo modelo LASH, representará, de forma adequada, o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas dos arroios Pelotas e Fragata.

2 Revisão Bibliográfica

2.1. Hidrologia e ciclo hidrológico

Segundo Chow (1964), a hidrologia é o ramo da ciência que estuda a água na Terra, bem como sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físicas e químicas e sua relação com o meio ambiente.

A água na Terra existe num espaço denominado de hidrosfera, o qual se estende cerca de 15 km acima da atmosfera e 1 km abaixo da litosfera (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). A hidrosfera, a atmosfera e a litosfera estão entre os principais componentes do sistema Terra apresentados por Press *et al.* (2004), podendo a atmosfera ser entendida como um invólucro gasoso que se estende desde a superfície terrestre até uma altitude de cerca de 100 km e a litosfera como uma espessa camada rochosa, que se estende da crosta e da parte superior do manto terrestre até uma profundidade média de 100 km.

À circulação da água na hidrosfera atribui-se o nome de ciclo hidrológico, sendo este o principal foco da hidrologia (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). Para Miranda, Oliveira e Silva (2010), o ciclo hidrológico constitui-se de uma sucessão de vários processos na natureza pelos quais a água inicia seu caminho indo de um estágio inicial até retornar à posição primitiva, sendo impulsionado fundamentalmente pela radiação solar e associado à gravidade e à rotação da Terra. Mello e Silva (2013) definem o ciclo hidrológico como a dinâmica da água no meio ambiente, compreendendo seus diferentes estados físicos – líquido, vapor e sólido – encontrados em diferentes ambientes do globo terrestre, tais como atmosfera, oceano, solo, leitos naturais de escoamento, montanhas e outros. De acordo com Suguio (2006), o ciclo hidrológico é representado pelos mecanismos de transferência contínua da água existente na Terra, dos oceanos e dos próprios continentes para a atmosfera, em forma de vapor, e, em seguida, precipitando sobre os oceanos e continentes, envolvendo assim vários reservatórios naturais entre os quais as partículas de água se movem com o decorrer do tempo.

Para Mendiondo e Tucci (1997), o ciclo hidrológico deve ser analisado dentro de seus componentes, de acordo com a dinâmica de sua ocorrência e

sobre as características do sistema, sendo que a dinâmica envolve as mudanças das variáveis no tempo e no espaço, enquanto que o espaço incorpora também as características do sistema – como solo, uso do solo, etc. – as quais apresentam pouca variação em curto período de tempo. Esses processos são extremamente não-lineares e agem diretamente sobre o meio e a vida no planeta, ressaltam os autores.

Na Figura 1 estão ilustrados os principais componentes do ciclo hidrológico em uma escala global. Este ainda pode ser analisado em escala de continente, em bacias hidrográficas internacionais que envolvem grandes rios, como a bacia Amazônica, em bacias hidrográficas nacionais da ordem de milhares de km², como a bacia do rio São Francisco, em bacias de médio e pequeno porte, na ordem de alguns km², ou ainda em bacias com algumas dezenas de hectares, as quais constituem-se em laboratórios para investigações hidrológicas, sendo a definição da escala dependente dos objetivos técnicos e científicos da análise (MELLO; SILVA, 2013). Com relação à escala de análise, Miranda, Oliveira e Silva (2010) relatam que quando global, o volume de água disponível em cada parte do ciclo hidrológico é relativamente constante, contudo, quando se trata de uma área limitada, a quantidade de água em cada parte do ciclo varia continuamente, dentro de amplos limites, explicando assim a abundância e a escassez das chuvas sobre a Terra. Estudos acerca de modelagem hidrológica conduzem a análise do ciclo hidrológico em escala de bacia hidrográfica.

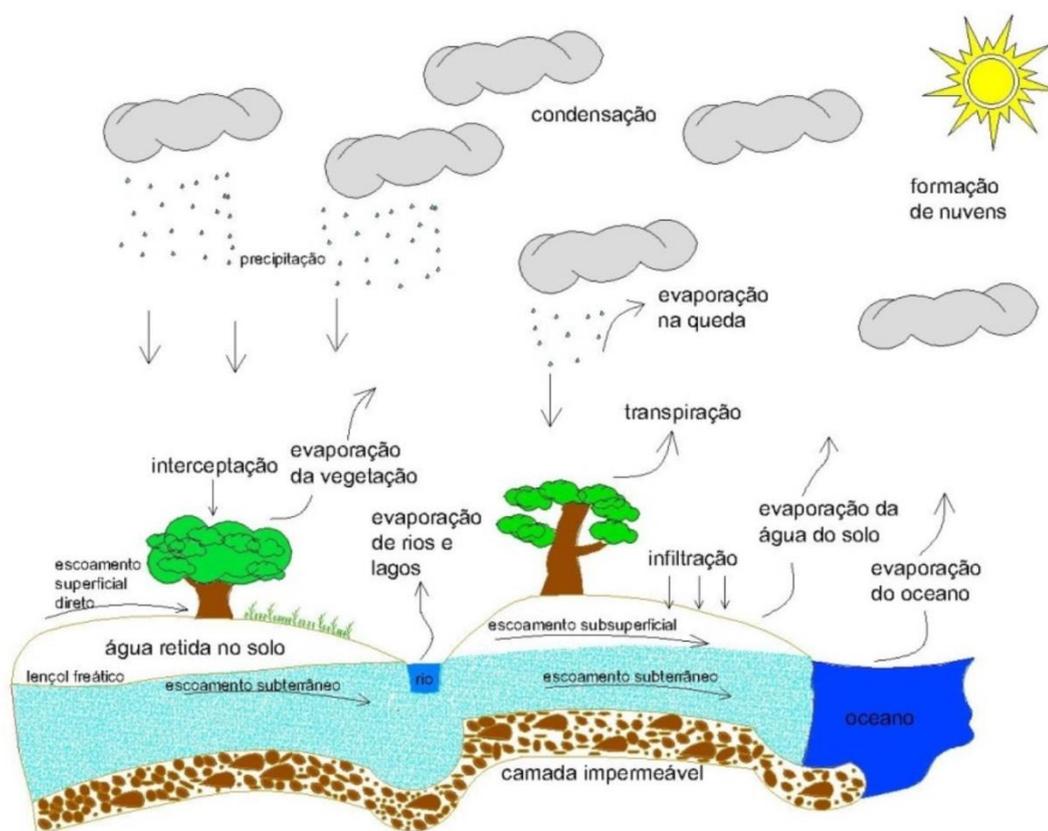


Figura 1 - Representação do ciclo hidrológico em escala global
 Fonte: Beskow, Souza e Luz (2015)

O ciclo hidrológico, apesar de não ter início nem fim, ocorrendo continuamente no tempo, pode ser entendido a partir da evaporação da água dos oceanos, como sugere Linsley, Kohler e Paulhus (1975).

Para Allen *et al.* (1998), a evaporação é o processo pelo qual a água no estado líquido é convertida para o estado de vapor e, então, removida da superfície de evaporação. Este processo, segundo os autores, ocorre devido a energia proveniente da radiação solar direta e da temperatura do ar, além de ser influenciado também pela umidade do ar e pela velocidade do vento. Miranda, Oliveira e Silva (2010) descrevem a evaporação como o conjunto de fenômenos físicos que condicionam a transformação da água, na forma líquida ou sólida, de uma superfície úmida ou de água livre, em vapor, devido à radiação solar e aos processos de difusão molecular e turbulenta. Raghunath (2006) ainda destaca que a temperatura da água, a área de superfície de contato, a pressão

barométrica e a salinidade da água também exercem influência no processo de evaporação, apresentando, os dois últimos, menor efeito.

Os oceanos constituem o principal reservatório do ciclo hidrológico global, retendo mais de 97% da água existente na Terra (CHAHINE, 1992). No caso da evaporação da água superficial dos oceanos, Suguio (2006) relata que este processo é lento e que o vapor de água transmitido para a atmosfera tem um tempo médio de residência de 10 dias, quando, então, é precipitado.

A precipitação, principal componente de entrada do ciclo hidrológico na sua fase terrestre, pode ser definida conceitualmente como uma forma de umidade presente na atmosfera que, em função das condições termodinâmicas desta, condensa, forma nuvens e precipita na forma de chuva, granizo, neve, orvalho, geada ou neblina, sendo a precipitação que atinge a superfície na forma líquida – a chuva – a mais comum em regiões tropicais e subtropicais (MELLO; SILVA, 2013).

Em função do mecanismo de formação, as precipitações podem ser classificadas como frontais, orográficas ou convectivas. As precipitações frontais são aquelas que ocorrem devido ao encontro de uma massa de ar quente com uma massa de ar frio, ocasionando eventos de longa duração e de intensidade média, atingindo grandes áreas (TUCCI, 2009). Já as precipitações orográficas geralmente apresentam alta intensidade e ocorrem quando massas de ar com alto teor de umidade atingem áreas com presença de montanhas ou outros tipos de elevação, enquanto que as precipitações convectivas, que apresentam alta intensidade, curta duração e atingem áreas concentradas, são provocadas pela evaporação devido a altas temperaturas, formando nuvens carregadas de umidade (MELLO; SILVA, 2013).

Uma vez ocorrendo precipitação, esta pode incidir diretamente sobre corpos hídricos ou então sobre a superfície, onde uma parcela do total precipitado é interceptada pela vegetação ou outros obstáculos, retornando à atmosfera, em ambos os casos, devido ao processo de evaporação.

A interceptação pode ser definida como sendo a capacidade que a vegetação ou outros tipos de obstáculo possuem de reter a chuva nas suas copas (MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010). Para Tucci (2009), a interceptação é um processo altamente dependente das características das precipitações, das

condições climáticas, da densidade da vegetação, da estrutura e arquitetura do dossel e do comportamento fisiológico das plantas durante o ano. Segundo Linsley, Kohler e Paulhus (1975), a interceptação por florestas ou outras coberturas densas pode atingir 25% da precipitação total anual. Shuttleworth (1993) corrobora relatando que a interceptação por florestas pode variar entre 10 e 30% da precipitação, acrescentando que esta variação é condicionada pela própria precipitação; quando a precipitação é convectiva, a floresta pode interceptar 10 a 18% do total precipitado, já quando é frontal, 20 a 30%..

A água precipitada, descontada a parcela interceptada pela vegetação ou outros obstáculos, atinge o solo, podendo ficar armazenada em depressões, escoar sobre a superfície do terreno, infiltrar no solo ou escoar através do solo como fluxo subsuperficial (BESKOW; SOUZA; LUZ, 2015).

A infiltração, como conceituada por Miranda, Oliveira e Silva (2010), é o processo de penetração da precipitação que atinge o solo nas camadas próximas à superfície do terreno, movendo-se para baixo, através dos poros vazios, sob ação da gravidade, até atingir uma camada suporte que a retém, formando então o teor de umidade do solo. Tucci (2009) relata que a infiltração depende fundamentalmente da água disponível para infiltrar, do tipo de solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e de ar presentes no seu interior. Segundo Mello e Silva (2013), a infiltração é uma parcela fundamental do ciclo hidrológico, pois influencia diretamente diversos processos, como a geração do escoamento superficial direto, além de promover o preenchimento dos poros do solo pela água, a qual pode ficar retida na matriz e ser utilizada pelas plantas ou ainda recarregar os aquíferos.

A água retida na matriz do solo pode retornar à atmosfera por meio da evaporação e da transpiração. De acordo com Allen *et al.* (1998), a transpiração é a vaporização da água líquida contida nos tecidos das plantas e a posterior transferência desse vapor para a atmosfera. A perda de água da planta para a atmosfera ocorre através dos estômatos – pequenos orifícios na folha que permitem a passagem de gases e vapor de água – e é regulada pela resistência estomatal, sendo influenciada por características meteorológicas, do solo e da própria planta. A evaporação da água retida na matriz do solo e a transpiração

pelas plantas ocorrem simultaneamente e é difícil distinguir os dois processos, por isso são somados e, conceituando-se a evapotranspiração (ALLEN *et al.*, 1998).

Ainda com relação à água retida na matriz do solo, em situações de estresse hídrico nas suas camadas superiores, pode haver um fluxo ascendente originário do lençol freático, denominado de ascensão capilar, frequentemente observado em regiões de descarga do aquífero, como em matas ciliares (VIOLA, 2008).

Retornando à precipitação que atinge o solo, se sua intensidade for superior à capacidade de infiltração do solo, ou ainda se este encontra-se saturado, o excesso de precipitação escoar superficialmente até atingir um corpo hídrico ou passa a ser retido em depressões do terreno.

A retenção da precipitação que atinge o solo em depressões do terreno pode ocorrer na ordem de magnitude de partículas de solo a grandes áreas inundadas, relatam Linsley, Kohler e Paulhus (1975), enfatizando que a água retida retorna à atmosfera por evaporação ou infiltra no solo após cessar o evento de precipitação.

Já a parcela da precipitação que excede a capacidade de infiltração do solo e não fica retida nas depressões do terreno, denominada de precipitação efetiva, escoar sobre a superfície, podendo ocasionar cheias (SILVA *et al.*, 2008). Ao escoamento que ocorre devido a esse excesso de precipitação, dá-se o nome de escoamento superficial direto, o qual está diretamente relacionado ao dimensionamento de obras hidráulicas e ao estudo da erosão e do transporte de sedimentos, relatam Silva *et al.* (2008), sendo considerado o principal processo associado à erosão hídrica (PRUSKI; RODRIGUES; SILVA, 2001).

O escoamento superficial direto, juntamente com o escoamento subsuperficial e o escoamento de base, constituem os três componentes do escoamento superficial, um seguimento do ciclo hidrológico que estuda o deslocamento das águas na superfície da Terra, considerado um dos mais importantes para o manejo de bacias hidrográficas (SILVA *et al.*, 2008).

Ocorrendo numa camada de solo bastante próxima à superfície, o escoamento subsuperficial é difícil de ser quantificado de forma isolada, sendo muitas vezes analisado junto ao escoamento superficial direto (MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010). Em termos dinâmicos, relatam Mello e Silva (2013), o

escoamento subsuperficial apresenta uma taxa de drenagem mais lenta que o escoamento superficial direto.

Já o escoamento de base, ou por vezes denominado escoamento subterrâneo, é, segundo Mello e Silva (2013), aquele produzido pela drenagem natural do aquífero, sendo bastante relevante do ponto de vista ambiental, uma vez que reflete na capacidade de produção de água da bacia, alimentando os cursos d'água durante períodos de estiagem. Ao comparar o escoamento de base ao demais componentes do escoamento superficial, em termos dinâmicos, os autores ainda relatam que este é bastante lento, podendo demorar vários dias para que haja mudança significativa nos valores de vazão em uma seção de controle após um evento de precipitação.

A água proveniente da precipitação direta sobre as calhas dos rios, do escoamento superficial direto, do escoamento subsuperficial e do escoamento de base, se concentra em cursos d'água e pode atingir corpos hídricos maiores, como lagos, lagoas, oceanos, etc., onde evapora novamente, visto que o ciclo hidrológico continua (BESKOW; SOUZA; LUZ, 2015).

A compreensão dos complexos fenômenos naturais que envolvem o ciclo hidrológico, bem como das suas inter-relações, desde a precipitação até a ocorrência de escoamento superficial, é de suma importância para o entendimento de fundamentos acerca de simulação hidrológica (MELLO *et al.*, 2008).

Neste contexto, os modelos hidrológicos chuva-vazão, os quais representam a parte do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão, devem descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação e nas depressões do solo, o fluxo através do solo pela infiltração, percolação e água subterrânea e as parcelas do escoamento superficial, subsuperficial e no rio (TUCCI, 2005).

2.2. Modelagem hidrológica

2.2.1. Definições

Um sistema, segundo definição de Dooge (1973), é uma estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num tempo de referência inter-relaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação.

Um modelo é a representação do comportamento de um sistema, e pode ser classificado como físico, analógico ou matemático. Um modelo físico representa a natureza do sistema por meio de um conjunto de equações ou sequências lógicas e, segundo Tucci (2005), é mais versátil, pois permite analisar diferentes situações em um mesmo sistema ou em diferentes sistemas. Entretanto, pode apresentar desvantagens, haja vista as dificuldades intrínsecas à discretização de processos contínuos e à representação matemática de alguns processos físicos. Ao processo de utilização de um modelo, dá-se nome de simulação.

Em modelagem hidrológica, entende-se por fenômeno um processo físico que produz alteração de estado do sistema, por variável um valor que descreve quantitativamente um fenômeno e por parâmetro um valor que caracteriza o sistema, podendo variar no tempo e, ou, no espaço (TUCCI, 2005).

Neste contexto, e considerando a bacia hidrográfica como um sistema, pode-se entender a simulação chuva-vazão como a aplicação de um modelo hidrológico matemático para sua representação, simulando o escoamento (fenômeno) pela quantificação da vazão (variável), dado um evento climático (entrada).

2.2.2. Classificação de modelos hidrológicos

Os modelos hidrológicos podem ser classificados sob diferentes aspectos, todavia, comumente são empregadas classificações de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de

relação entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos) (MOREIRA, 2005).

Um modelo hidrológico é dito estocástico quando, segundo Viola (2011), aborda em sua formulação conceitos de probabilidade; quando a chance de ocorrência de uma variável não é considerada, o modelo segue uma lei definida que não a lei das probabilidades e, então, é dito determinístico. De acordo com Tucci (2005), esta é uma das principais classificações dentro da modelagem hidrológica.

Os modelos hidrológicos também podem ser classificados quanto à formulação em conceituais ou empíricos, segundo Tucci (2005). Tal autor relata que os modelos são ditos conceituais quando as funções empregadas para representar o comportamento do sistema levam em consideração os processos físicos; quando não consideram estes processos, o modelos são ditos empíricos. Segundo Viola (2011), a definição de modelo conceitual é abstrata, pois, embora sejam aplicadas formulações que visem descrever fisicamente os processos, aplicam-se parâmetros calibráveis, o que mantém o caráter empírico; o modelos hidrológicos com este tipo de abordagem são classificados como semiconceituais. Existe ainda um quarto tipo de formulação, referindo-se à modelos físicos, os quais empregam equações diferenciais para descrever os processos através de parâmetros determinados com base física (VIOLA, 2011).

Com relação à forma de representação dos dados, os modelos hidrológicos podem ser classificados como discretos ou contínuos; os discretos objetivam a modelagem de períodos isolados de uma série histórica, buscando representar eventos de cheia ou recessão, enquanto que os contínuos objetivam a modelagem de longos períodos, geralmente contemplando diferentes comportamentos hidrológicos (MARINHO FILHO *et al.*, 2012).

Conforme Rennó (2003), os fenômenos naturais que envolvem o ciclo hidrológico variam continuamente no tempo e no espaço, no entanto, sua representação através de modelos matemáticos requer um grau de discretização.

As variáveis temporais de entrada, comumente empregadas em modelos hidrológicos chuva-vazão, são a precipitação, a evapotranspiração potencial e a

vazão (TUCCI, 2005). De acordo com Maidment (1993), tais variáveis, por serem obtidas por monitoramento, geralmente são observadas em intervalos de tempo pré-definidos, não sendo conhecidas suas variações entre observações, o que implica na aceitação de uma variação média no intervalo. Segundo Viola (2011), a discretização temporal, também denominada passo do modelo, está diretamente relacionada à acurácia desejada e à disponibilidade de dados.

A discretização espacial, por sua vez, está relacionada à área na qual as variáveis são consideradas homogêneas, podendo classificar o modelo como concentrado ou distribuído. Nos modelos hidrológicos com abordagem concentrada, cada variável assume um valor que representa homogeneamente a bacia em análise, o que limita a representação da variabilidade espacial das características da bacia (HARTMANN; BALES; SOROOSHIAN, 1999). O mesmo não ocorre em modelos com abordagem distribuída, haja vista que a bacia hidrográfica é subdividida em sub-bacias (modelo semidistribuído) ou em células (modelo distribuído), o que proporciona descrição mais acurada da variabilidade espacial e das variáveis de entrada (COLLISCHONN, 2001).

Os modelos hidrológicos podem ainda ser estacionários, descrevendo o fenômeno, em determinado momento, sem variação temporal dos parâmetros, ou dinâmicos, para os quais os parâmetros variam em função do tempo (MARINHO FILHO *et al.*, 2012).

2.2.3. Etapas da modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica em bacias hidrográficas considera, usualmente, as etapas de análise de sensibilidade, de calibração, de validação e de predição.

A primeira etapa da aplicação de um modelo hidrológico é a análise de sensibilidade. Segundo White e Chaubey (2005), esta etapa visa avaliar a influência da alteração do valor de diferentes parâmetros na resposta de uma variável de saída, sendo os parâmetros mais sensíveis, ou aqueles que exercem maior influência, empregados na etapa de calibração.

A compreensão sobre todos os parâmetros de entrada de um modelo hidrológico, bem como dos processos que por ele são representados, é extremamente necessária para que a calibração dos parâmetros seja coerente

(LENHART *et al.*, 2002), sendo a acurácia dessas previsões altamente dependentes do quão bem definidas são as estruturas do modelo e de como esses parâmetros são determinados (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1994).

Desta forma, Castro (2013) relata que a delimitação de intervalos para variação dos parâmetros é extremamente importante para definir a sensibilidade; os limites de variação devem ser definidos de acordo com as características da bacia hidrográfica analisada, caso contrário, parâmetros que não são sensíveis podem apresentar alta sensibilidade e parâmetros que são realmente importantes podem ser desconsiderados por apresentarem baixa sensibilidade.

Os métodos de análise de sensibilidade podem ser de análise local ou global. A análise de sensibilidade local dispõe a tendência do modelo em um dado ponto amostral, enquanto que a análise de sensibilidade global é capaz de abranger todo o espaço amostrado, sendo analiticamente mais complexa (SALTELLI *et al.*, 2004).

Beskow, Mello e Norton (2011) relatam que a análise de sensibilidade tem sido aplicada com sucesso em inúmeros estudos voltados à calibração de modelos hidrológicos, destacando Muleta e Nicklow (2005), White e Chaubey (2005) e Van Griensven *et al.* (2006).

A calibração, por sua vez, consiste no ajuste, para a bacia hidrográfica em análise, de um conjunto de parâmetros desconhecidos ou indiretamente mensuráveis, indicados pela análise de sensibilidade. Collischonn e Tucci (2003) relatam que esta etapa exige maior esforço do usuário, haja vista a necessidade de compreensão do comportamento do modelo e dos parâmetros e os problemas atrelados à qualidade e representatividade dos dados hidrológicos.

De acordo com Her e Chaubey (2015), quando uma única variável de saída do modelo, como por exemplo a vazão, é associada à múltiplos processos e a muitos parâmetros, o número de parâmetros a serem calibrados tende a ser maior que o número de variáveis a serem comparadas na calibração, caracterizando a *over-parametrization*. Ao tentar ajustar um grande número de parâmetros a partir de um número limitado de observações, segundo tais autores, a solução para a calibração tende a não ser única.

Neste sentido, destaca-se o conceito de equifinalidade, que é a existência de vários conjuntos de parâmetros que proporcionam resultados satisfatórios e

bastante semelhantes entre si, sendo impossível distinguir a melhor combinação (BEVEN, 2004). A equifinalidade, segundo Her e Chaubey (2015), vem sendo, nas últimas 3 décadas, bastante discutida na literatura associada à modelagem hidrológica, destacando-se alguns trabalhos como Sorooshian e Gupta (1983), Beven e Binley (1992), Gan e Biftu (1996), Beven e Freer (2001) e Beven (2006).

Neste sentido, Collischonn e Tucci (2003) destacam que, assim como podem ser obtidas várias combinações de parâmetros com justificativa técnica e resposta adequada para o problema, e entre as quais não é possível, em geral, distinguir a mais aceitável ou a melhor, podem existir soluções que atendam às equações, mas não representam a realidade lógica do problema ou mesmo dos valores esperados dos parâmetros.

Her e Chaubey (2015) relatam que a equifinalidade pode ser mais severa no caso da calibração de modelos distribuídos, como o SWAT, o qual apresenta *over-parametrization* quando observações adicionais não são disponibilizadas. Frente ao exposto, ressalta-se o princípio da parcimônia, que é a representação adequada do comportamento de um processo ou de um sistema por um modelo com o menor número possível de parâmetros (TUCCI, 2005). Muitos estudos têm empregado este princípio para propor modelos hidrológicos com abordagem simplificada o suficiente para evitar *over-parametrization* e reduzir as incertezas, como é o caso do *Topography Based Hydrological Model* (TOPMODEL) e do *Hydrology Laboratory Research Modeling System* (HL-RMS) (HER; CHAUBEY, 2015).

A etapa de calibração de parâmetros, segundo Beskow (2009), pode ser realizada, basicamente, por tentativa e erro ou por métodos automáticos. Em ambos os casos, o objetivo é encontrar valores para um conjunto de variáveis de modo a representar o fenômeno natural da forma mais realística, contudo, na primeira metodologia, são testadas diferentes combinações, enquanto que na segunda, empregam-se métodos matemáticos de otimização.

No método por tentativa e erro, considerado pioneiro na calibração de modelos hidrológicos chuva-vazão devido à sua robutez e simplicidade, apesar de demorado e subjetivo, a eficácia é altamente dependente da experiência do usuário (COLLISCHONN; TUCCI, 2003). Os autores relatam ainda que não basta

entender o modelo; tem que ter habilidade para encontrar uma solução por tentativa.

O ajuste dos parâmetros, seguindo este método, ocorre de forma manual, em repetidas execuções do modelo e análises de resultados. A cada tentativa o usuário verifica, com base nos hidrogramas observado e calculado, o formato geral e o ajuste das vazões mínimas e de cheias, podendo ainda observar os valores de algumas funções objetivo (COLLISCHONN; TUCCI, 2003).

Para minimizar as dificuldades de calibração intrínsecas ao método da tentativa e erro, foram desenvolvidas técnicas automáticas de otimização de parâmetros, contudo, ressalta Tucci (2005), não significa que a experiência do usuário é dispensável, pois a solução matemática também pode convergir para valores de parâmetros irrealis.

As técnicas automáticas de otimização buscam os valores dos parâmetros de forma automática, proporcionando o melhor resultado para uma função dependente dessas variáveis, dentro de um objetivo e obedecidas suas restrições (TUCCI, 2005). O procedimento comumente adotado na calibração automática de parâmetros emprega algoritmos de calibração, funções objetivo e critérios de parada.

Existem várias classes de algoritmos de calibração disponíveis na literatura, como os de busca local, os de gradiente, os baseados na segunda derivada e os de otimização global, destaca Beskow (2009). No entanto, devido às dificuldades encontradas para o propósito de modelagem hidrológica empregando os métodos do gradiente e da segunda derivada, estes não têm sido utilizados em modelos conceituais.

Já os algoritmos de busca local eram os mais empregados, contudo, relatam Duan, Sorooshian e Gupta (1992), não foram desenvolvidos para lidar com alguns problemas associados à calibração de modelos conceituais. Segundo Collischonn e Tucci (2003), em duas aplicações idênticas quanto à bacia hidrográfica e ao tempo de calibração, estes algoritmos tendem a calibrar valores diferentes para um mesmo conjunto de parâmetros, dependendo do ponto de partida da busca. Isso ocorre em virtude das superfícies de resposta das funções objetivo comumente utilizadas, as quais são não lineares e descontínuas (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992; XIONG; O'CONNOR, 2000). Sobre essas

superfícies de resposta, enfatizam Collischonn e Tucci (2003), as técnicas de calibração baseadas em busca local tendem à gerar resultados pouco confiáveis.

Com relação aos algoritmos de otimização global, Beskow (2009) relata que estes vêm sendo amplamente empregados na modelagem hidrológica, destacando o Shuffled Complex Evolution (SCE-UA), desenvolvido por Duan, Sorooshian e Gupta (1992), como um algoritmo robusto e computacionalmente eficiente.

Na aplicação de algoritmos de calibração, uma das partes fundamentais é o estabelecimento da função objetivo, que é a representação matemática da qualidade dos resultados obtidos para um conjunto de parâmetros calibrados. O algoritmo de calibração atribui valores ao conjunto de parâmetros e calcula a função objetivo, seguindo em busca do valor ótimo até que seja constatada a convergência dos valores dos parâmetros, quando o processo iterativo encerra-se. O critério de parada do processo iterativo da calibração automática pode ser definido, segundo Sorooshian e Gupta (1995) pela convergência da função objetivo, pela convergência dos valores dos parâmetros ou por um número máximo de iterações.

O estabelecimento da função objetivo é totalmente dependente da finalidade a que se propõe a modelagem hidrológica. A modelagem hidrológica objetiva aproximar o máximo possível o hidrograma calculado a partir do modelo àquele observado na seção de controle, devendo a função objetivo, neste caso, medir a discrepância entre os valores para que possa ser minimizada (TUCCI, 2005). A função quadrática da diferença das vazões geralmente apresenta melhores resultados para esta aplicação, ressaltam Collischonn e Tucci (2003), contudo, pode gerar resultados tendenciosos, pois tende a priorizar os valores maiores à medida que se minimiza o desvio quadrático das vazões.

Quando é otimizado o valor de uma única função objetivo, o processo de calibração automática é denominado mono-objetivo, entretanto, quando otimizado o valor de duas ou mais funções objetivo simultaneamente, o processo de calibração automática é denominado multiobjetivo.

Outra importante consideração sobre a etapa de calibração de modelos hidrológicos concerne aos dados empregados. Segundo Perrin *et al.* (2007), existem poucas recomendações sobre o quão longa uma série de dados de vazão

deve ser para gerar resultados satisfatórios na calibração, sendo comumente considerado que “quanto maior, melhor”, ou então, de dois a dez anos de observações.

Sorooshian, Gupta e Fulton (1983) relatam que o conteúdo da informação é mais importante que a quantidade de dados, pois até mesmo poderosos métodos de calibração não conseguiriam extrair informações que não estão presentes. Os autores sugerem que seja empregado, no mínimo, um ano hidrológico completo de dados observados para calibração de modelos chuva-vazão.

Já Perrin *et al.* (2007), calibrando os modelos GR4J (PERRIN; MICHEL; ANDRÉASSIAN, 2003) e TOPMO (MICHEL; PERRIN; ANDRÉASSIAN, 2003), versão modificada do TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979), para doze bacias hidrográficas americanas, com várias características hidrológicas e climáticas, constataram que, de modo geral, 350 dias, escolhidos aleatoriamente em um longo período de tempo, são suficientes para obter uma robusta estimativa de parâmetros.

Via de regra, a definição do período de dados a ser empregado na calibração de parâmetros de um modelo hidrológico está atrelada à disponibilidade de dados observados, sendo bastante variável na literatura (Tabela 1).

Tabela 1 - Estudos envolvendo a calibração de modelos hidrológicos chuva-vazão e o período de dados empregados para tal finalidade

Autores	Modelo hidrológico	Período empregado
Eckhardt e Arnold (2001)	SWAT	3 anos hidrológicos
Beskow <i>et al.</i> (2011)	LASH	2 anos civis
Viola <i>et al.</i> (2012)	LASH	7 anos civis
Viola <i>et al.</i> (2014)	LASH	8 anos civis
Devkota e Gyawali (2015)	SWAT	10 anos civis

O processo de validação de um modelo hidrológico, a fim de analisar sua acurácia nas aplicações pretendidas, deve abranger testes avaliados por coeficientes estatísticos (VIOLA, 2008). Klemeš (1986) apresenta um roteiro de testes para validar modelos hidrológicos em quatro distintas aplicações, descritas

a seguir, em ordem crescente de complexidade, a saber: *Split sample test*, *Proxy basin*, *Differential Split-sample* e *Proxy-basin differential split-sample*.

O teste *Split sample* é empregado na validação de modelos para aplicação a processos estacionários com calibração e simulação na mesma bacia, como é o caso do preenchimento de períodos falhos em série histórica fluviométrica. Este teste consiste na aplicação de dois períodos de tempo distintos: um período para calibrar o modelo hidrológico e outro para aplicar os parâmetros obtidos com a calibração. O modelo deve apresentar resultados satisfatórios em ambos os períodos. Cabe ressaltar que uma série histórica estacionária, de acordo com Tucci (2005), é caracterizada pela constância dos valores dos parâmetros estatísticos ao longo do tempo.

O teste *Proxy basin* é utilizado para validar a aplicação do modelo a processos estacionários com calibração e simulação em bacias distintas, como, por exemplo, na geração de séries históricas em bacias hidrográficas sem monitoramento fluviométrico. Nessa situação, é recomendado que sejam empregadas duas bacias hidrográficas A e B com características edafoclimáticas semelhantes à da bacia C onde deseja-se obter os dados, utilizando uma para calibração e outra para validação dos parâmetros calibrados, devendo-se observar bons resultados.

O teste *Differential Split-sample* é empregado na validação do modelo para aplicação a processos não estacionários, com calibração e simulação na mesma bacia. A aplicação deste teste se dá em bacias hidrográficas com monitoramento, para validar modelos para a simulação de mudanças no regime fluviométrico em decorrência de mudanças climáticas ou de uso do solo.

Se o objetivo for verificar o impacto das alterações do regime pluvial, por exemplo, devem ser identificados, nos registros históricos existentes, um período chuvoso e outro seco, caracterizados por valores acima e abaixo da média, respectivamente. O procedimento de calibração e aplicação do modelo calibrado, para o estabelecimento das estatísticas que permitem avaliá-lo, depende das aplicações pretendidas. Se o objetivo for avaliar os impactos de uma redução do regime pluvial, o modelo deve ser calibrado com dados do período chuvoso e aplicado no período seco, ou vice-versa, obtendo-se boas estatísticas.

Já a validação para a simulação de alterações do regime fluvial devido a mudanças no uso do solo requer o conhecimento histórico de uso do solo na bacia, buscando identificar um período prévio à mudança no uso do solo e outro posterior. O teste consiste na calibração do modelo no período prévio às alterações, e aplicação, com as devidas modificações nos parâmetros atrelados à cobertura vegetal, no período após as alterações, esperando-se bons resultados.

O *Proxy-basin differential split-sample* teste é empregado na validação de modelos para aplicação em processos não estacionários calibrados e simulados em bacias distintas, como no caso da validação de modelos hidrológicos para aplicação em simulação de mudanças hidrológicas em bacias hidrográficas desprovidas de monitoramento hidrológico.

De modo semelhante ao *Proxy basin*, é necessário empregar dados de duas bacias hidrográficas A e B com características edafoclimáticas semelhantes à da bacia C sem registros históricos.

No caso da validação para utilização em alterações de regime pluvial, é necessário identificar períodos chuvosos e secos na bacia A (A_{chuvoso} e A_{seco}) e na bacia B (B_{chuvoso} e B_{seco}). Se o objetivo for validar o modelo para aplicação a um cenário de baixas precipitações, deve-se realizar a calibração com o período A_{chuvoso} e aplicação com o B_{seco} e, posteriormente, calibração com B_{chuvoso} e aplicação com A_{seco} , e encontrar bons resultados.

Segundo Collischonn (2001), a validação de modelos hidrológicos chuva-vazão tem sido realizada com o emprego do teste *Split sample*, contudo, alguns trabalhos têm aplicado também o *Proxy basin*. No entanto, a definição do teste a ser empregado na validação é função principalmente do objetivo da análise, como no estudo de Magand *et al.* (2015), que empregaram o teste *Differential Split-sample* para validar o *Catchment Land Surface Model* (CLSM) para a bacia hidrográfica do alto Durance, localizada nos Alpes Franceses, objetivando a simulação de cenário de mudanças climáticas.

Os principais coeficientes estatísticos utilizados nos testes para avaliação do desempenho dos modelos são: o coeficiente de Nash e Sutcliffe (C_{NS}) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), o coeficiente de determinação (R^2) (LEGATES; MCCABE, 1999) e a relação entre volumes medidos e calculados de vazões (Δv), (COLLISCHONN, 2001).

2.3. Desenvolvimento dos modelos hidrológicos

A Figura 2 permite visualizar uma linha do tempo, onde são apresentados alguns dos estudos científicos acerca do desenvolvimento de modelos hidrológicos, datando do século XIX até o presente momento.



Figura 2 - Linha do tempo do desenvolvimento dos modelos hidrológicos, representado alguns estudos realizados desde o século XIX até o desenvolvimento da segunda versão do modelo *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH)

Os primeiros modelos aplicados à hidrologia começaram a ser desenvolvidos há mais de um século, com o propósito de representar isoladamente os processos hidrológicos e, segundo Lou (2010), buscar responder as questões emergentes da época.

Em 1851 surgia o primeiro e amplamente utilizado modelo hidrológico chuva-vazão, desenvolvido pelo engenheiro irlandês Thomas James Mulvaney (1822-1892): o modelo de Mulvaney (MULVANEY, 1851), que passaria a ser conhecido como Método Racional. Este método é mais aplicado na hidrologia prática para estimativa da vazão máxima decorrente de um evento de precipitação, haja vista sua simplicidade e o fato de ser, de acordo com Grimaldi e Petroselli (2015), surpreendentemente confiável e preciso frente à escassez de dados de entrada.

O engenheiro francês Henry Philibert Gaspard Darcy (1803-1858) formulou experimentalmente, em 1856, uma lei que descreve o movimento da água através de uma coluna vertical de meio poroso homogêneo e saturado, denominada Lei de Darcy, a qual tem constituído a base para a descrição quantitativa de fluxo de fluidos em meios porosos saturados naturais e artificiais (GRAY; MILLER, 2004).

Em 1911 dois cientistas australianos, W. Heber Green (1868-1932) e G. A. Ampt (1887-1953), desenvolveram um modelo (GREEN; AMPT, 1911) que busca explicar o comportamento físico do fenômeno de infiltração de água no solo, baseado numa aproximação do perfil de infiltração e em outras premissas (MELLO; SILVA, 2013). O modelo de Green-Ampt e suas várias modificações, como a proposta por Mein e Larson (1973), são amplamente utilizados para analisar as relações entre precipitação, infiltração e escoamento, relatam Chen *et al.* (2015).

Já em 1921, surgia um dos primeiros estudos acerca da modelagem de hidrograma, podendo o engenheiro australiano Cecil Napier Ross (1885-1959) ser considerado o pioneiro na utilização de modelagem distribuída (BEVEN, 2004). Ross (1921) introduziu o conceito de diagrama tempo-área, o qual representa o *delay* do escoamento em cada zona da bacia hidrográfica, e está presente em muitos modelos hidrológicos distribuídos empregados atualmente, relata Beven (2004).

No final da década de 1920, o engenheiro L. G. Puls, o qual integrava o *United States Army Corps of Engineers*, desenvolveu um método para propagar vazões em reservatórios, conhecido como método de Puls (PULS, 1928).

Em 1932 o engenheiro americano Le Roy K. Sherman (1870-1954) publicou o artigo científico intitulado *Streamflow from rainfall by the unit-graph method*, introduzindo a técnica do *unit-graph*, o que conhecemos hoje como hidrograma unitário, dando início a uma das mais comumente utilizadas técnicas da hidrologia para modelagem de hidrogramas (BEVEN, 2004)

Em 1933 o engenheiro Robert E. Horton (1875-1945) publicou um artigo científico intitulado *The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle* (HORTON, 1933), onde, baseando-se em experimento de campo, discorreu sobre o processo de geração de escoamento superficial direto quando a capacidade de infiltração de água no solo é excedida e empregou uma função empírica para descrever o

decréscimo da capacidade de infiltração de água no solo frente à um evento de precipitação.

Em 1939 o engenheiro americano Gerald T. McCarthy desenvolveu um modelo de propagação de vazões em rios (MCCARTHY, 1939), denominado de modelo de Muskingum, cujo nome faz referência ao rio Muskingum, onde o modelo foi aplicado. Uma adaptação deste modelo é o modelo de Muskingum-Cunge (CUNGE, 1969), o qual é amplamente utilizado, especialmente como módulo de modelos hidrológicos mais complexos (PONTES; COLLISCHONN, 2012).

Já nas décadas de 50 e 60, com o advento dos sistemas computacionais, pesquisadores passaram a desenvolver modelos que, através da interação entre os processos hidrológicos que regem o ciclo da água em escala de bacia, descrevem a transformação da chuva em vazão.

Em 1958, David M. Rockwood, integrando o *United States Army Corps of Engineers*, desenvolveu o *Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation Model*, conhecido pela sua sigla SSARR. Este modelo, em sua primeira versão (ROCKWOOD, 1958), foi desenvolvido especificamente para as condições do rio Columbia (região nordeste dos Estados Unidos) e objetivava simular o escoamento devido ao derretimento de neve, tendo sido utilizado para predição de vazões e projetos de reservatórios. Uma segunda versão do modelo hidrológico SSARR, possível de ser aplicada a qualquer bacia hidrográfica, foi apresentada em 1964 (ROCKWOOD, 1964) e, em 1968, uma terceira versão foi desenvolvida para as condições específicas do rio Mekong (ROCKWOOD, 1968). O modelo hidrológico SSARR apresenta uma abordagem distribuída por sub-bacias hidrográficas e é fundamentado, segundo Tucci (2005), em três módulos básicos, os quais compreendem a transformação chuva-vazão, o escoamento em rios e reservatórios e a regularização de vazões.

O *Stanford Watershed Model* pode ser considerado um dos mais empregados modelos hidrológicos (BEVEN, 2004), tendo sido desenvolvido entre os anos de 1959 e 1966, na universidade americana de Stanford, por Norman Crawford, Ray Linsley e colaboradores (CRAWFORD; BURGESS, 2004). Em 1966, sua versão mais conhecida, o Stanford IV, foi publicada (CRAWFORD; LINSLEY, 1966), introduzindo a distribuição espacial da avaliação da infiltração de

água no solo, e em 1974 foi desenvolvido seu sucessor, o *Hydrologic Simulation Program Fortran* (HSPF), como relatam Crawford e Burges (2004).

Dawdy e O'Donnel, vinculados ao *U. S. Geological Survey*, publicaram o artigo intitulado "*Mathematical Models of Catchments Behavior*" (DAWDY; O'DONNEL, 1965), descrevendo um modelo hidrológico de simulação de eventos chuva-vazão em bacias hidrográficas rurais. Uma versão deste modelo para bacias hidrográficas urbanas foi apresentada em Dawdy, Lichty e Bergman (1970).

Em 1968 foi apresentada a primeira versão do *Hydrologic Engineering Center 1 – Flood Hydrograph Package* (HEC-1), originalmente desenvolvida por Leo R. Beard e colaboradores, membros do *Hydrologic Engineering Center* (HEC), em 1967 (HEC, 1994). O modelo hidrológico HEC-1 evoluiu para o que conhecemos hoje como HEC – *Hydrological Modelling System* (HEC-HMS), contemplando modelagem contínua dos processos hidrológicos e também análises tradicionais em hidrologia, cuja abordagem é discreta.

Durante as décadas de 60 e 70, relata Tucci (2005), vários outros modelos hidrológicos foram apresentados, contudo, baseavam-se em combinações de outros algoritmos básicos dos modelos citados anteriormente. Na mesma época surgiram trabalhos que buscavam comparar o desempenho dos modelos hidrológicos, como WMO (1975), no entanto, os resultados da comparação não eram claros, haja vista que a influência das incertezas e da representividade dos dados era maior do que a influência das equações empregadas (TUCCI, 2005).

Tucci (2005) ainda relata que estes modelos tinham características bastante semelhantes, pois as principais limitações estavam atreladas à representação da distribuição temporal e espacial da precipitação, onde os erros eram maiores que os ganhos que poderiam ser incorporados pelas variantes de uma equação empírica e em detrimento de outra. Segundo o autor, a partir do final da década de 70, verificaram-se duas tendências no desenvolvimento de modelos hidrológicos:

- i) Redução do número de parâmetros: os modelos hidrológicos apresentavam muitos parâmetros, o que dificultava o ajuste. Considerando que os processos mais importantes empregavam 3 ou 4 parâmetros, que eram os de maior sensibilidade, e priorizando

estes parâmetros, era possível desenvolver modelos com menor número de funções e parâmetros e, desta forma, obter resultados igualmente satisfatórios; e

- ii) Aumento da preocupação ambiental e avaliação do impacto da alteração do uso do solo: os modelos passaram a ser desenvolvidos com maior base física, buscando estabelecer relações entre as características físicas do sistema e os parâmetros, objetivando assim reduzir o empirismo nas estimativas.

Em 1979 foi apresentado o *Topography Based Hydrological Model*, amplamente conhecido como TOPMODEL, idealizado por Keith J. Beven e Mike Kirkby (BEVEN; KIRKBY, 1979) com o objetivo de desenvolver um modelo de simulação contínua prático e pragmático, além de desenvolver uma estrutura teórica dentro da qual processos hidrológicos, questões de escala e realismo e procedimentos de modelo possam ser pesquisados. O TOPMODEL é um modelo hidrológico topograficamente baseado, no qual a modelagem chuva-vazão na seção de controle da bacia hidrográfica emprega índices topográficos que indicam a similaridade hidrológica em pontos dessa bacia, relatam Xiong e Guo (2004). Apresenta abordagem discretizada em sub-bacias hidrográficas, contudo, os índices topográficos são obtidos a partir de mapas discretizados em uma malha regular (TUCCI, 2005).

O modelo *Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation* (ANSWER) foi desenvolvido por Beasley, Huggins e Monke (1980) visando simular os processos hidrológicos e hidrossedimentológicos em pequenas bacias hidrográficas com uso predominantemente agrícola.

Lopes, Braga e Conejo (1982) apresentaram o modelo hidrológico chuva-vazão intitulado *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP), idealizado a partir da experiência de aplicação dos modelos Standford IV (CRAWFORD; LINSLEY, 1966) e Mero (MERO, 1969) em trabalhos realizados pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do estado de São Paulo. Segundo Buchianeri (2004), o modelo SMAP possui uma estrutura simples, com abordagem contínua no tempo, empregando os conceitos do SCS (1971) para separação do escoamento superficial direto.

Na década de 90, com o desenvolvimento de modelos climáticos globais, passou-se a observar a necessidade de integração entre estes e os modelos hidrológicos, contudo, os aspectos de escala da informação empregada eram um grande problema; uma quadrícula do *General Circulation Model* (CGM) era maior que toda a bacia usualmente simulada em hidrologia, ressalta Tucci (2005).

Em 1994, Wigmosta, Vail e Lettenmaier (1994) publicaram o artigo intitulado “*A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain*”, apresentando o *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM), um modelo distribuído, idealizado para bacias hidrográficas com área de drenagem superior a 10^4 km². O DHSVM tem sido empregado para análises e modelagem hidrológica (CUO *et al.*, 2008), e para o estudo da interação entre clima e hidrologia e do potencial impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos (COU *et al.*, 2009).

Flanagan e Nearing (1995) apresentaram o modelo *Water Erosion Prediction Project* (WEPP), desenvolvido no *National Soil Erosion Research Laboratory*, localizado na universidade americana de Purdue. De acordo com Flanagan e Nearing (1995), o WEPP é um modelo de longo termo que prediz a perda de solo e o depósito de sedimento sobre encostas e em pequenos canais da rede de drenagem, em virtude do escoamento superficial direto, além do depósito de sedimento em represamentos, tendo sido idealizado para pequenas bacias hidrográficas.

De Roo, Wesseling e Ritsema (1996) publicaram o artigo intitulado “*LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output*” apresentando à comunidade científica o Limburg Soil Erosion Model (LISEM). Segundo Jetten (2002), o LISEM é um modelo fisicamente baseado que simula os processos hidrológicos e o transporte de sedimentos durante e imediatamente após um evento de chuva sobre a bacia hidrográfica.

O modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) foi desenvolvido por Arnold *et al.* (1998) no *United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service*. Como relata Neitsch *et al.* (2005), o SWAT foi idealizado para prever o impacto das práticas de manejo do solo sobre a produção de água, sedimento e químicos agrícolas, em várias bacias

hidrográficas com distintas condições de solo, de uso do solo e de manejo, sob um longo período de tempo. O SWAT é um modelo fisicamente baseado, computacionalmente eficiente, e contínuo no tempo, permitindo simular longos períodos (BESKOW, 2009).

Em 2001, Walter Collischon apresentou o Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) (COLLISCHONN, 2001). Bravo *et al.* (2014) relatam que o MGB-IPH foi desenvolvido para modelagem em grande escala e tem sido aplicado com sucesso em bacias hidrográficas da América do Sul, sendo que, recentemente, tem sido utilizado na análise do impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos.

Marcelo Ribeiro Viola (VIOLA, 2008) apresentou a dissertação intitulada “Simulação hidrológica na região do alto rio Grande a montante do reservatório de Camargos/CEMIG”, onde desenvolveu e aplicou um modelo hidrológico semidistribuído. Este modelo foi aprimorado por Samuel Beskow (BESKOW, 2009) e recebeu o nome de *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH), um modelo hidrológico distribuído e de longo termo, idealizado para ser aplicado em bacias hidrográficas rurais. O modelo LASH tem sido aplicado com sucesso em bacias hidrográficas brasileiras de diferentes áreas de drenagem, como pode ser observado nos estudos de Mello *et al.* (2008), Viola *et al.* (2009), Beskow, Mello e Norton, (2011), Beskow *et al.* (2011), Viola *et al.* (2012), Beskow; Norton e Mello (2013), Viola *et al.* (2014), Viola *et al.* (2015) e Beskow *et al.* (2016).

Segundo Mello *et al.* (2008), os modelos hidrológicos encontram-se mais próximos da realidade física em comparação com outras metodologias para estimativa de vazões, impulsionados principalmente pelos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e pelas técnicas de sensoriamento remoto. Tais tecnologias possibilitam maior acurácia na descrição de parâmetros relacionados à vegetação, ao solo e à fisiografia da área de estudo, permitindo avaliar o impacto das mudanças climáticas e de uso do solo na meso ou, mesmo, na macroescala espacial.

Capítulo 1 – Modelo hidrológico Lavras Simulation of Hydrology (LASH): da concepção ao desenvolvimento da terceira versão

1 Introdução

Em 2008 um grupo de pesquisadores, envolvendo a Universidade Federal de Lavras, em Minas Gerais, e a Universidade de Purdue, nos Estados Unidos, deram início ao desenvolvimento de um modelo hidrológico chuva-vazão com embasamento conceitual, objetivando a estimativa de vazões em bacias hidrográficas tropicais e subtropicais. Segundo Mello *et al.* (2016), a primeira discussão a respeito de sua estrutura conduziu à conclusão de que o grande desafio seria a concepção de um modelo compatível com a realidade de países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, tanto em termos de processos hidrológicos quanto em termos de indisponibilidade de base de dados.

As primeiras aplicações do modelo desenvolvido por estes pesquisadores foram relatadas em Viola (2008), Mello *et al.* (2008) e Viola *et al.* (2009). Na Dissertação desenvolvida por Viola (2008), foi apresentada a estrutura do modelo – um modelo hidrológico semiconceitual, determinístico, de longo termo, concentrado e semidistribuído, baseado no método do CN Modificado (MISHRA *et al.*, 2006), no modelo MGB-IPH (COLLISCHONN, 2001) e no modelo de Muskingum-Cunge Linear (TUCCI, 2005), empregando o passo de simulação diário – e sua aplicação em duas bacias da região do alto rio Grande, à montante do reservatório da UHE de Camargos/CEMIG, em Minas Gerais.

Os resultados promissores obtidos por Viola (2008) para bacia do rio Grande, com seção de controle na região de cabeceira (2.080 km²), foram publicados por Mello *et al.* (2008), empregando o modelo na sua versão semidistribuída por sub-bacias hidrográficas, a qual apresentou melhor desempenho (VIOLA, 2008). De acordo com Mello *et al.* (2008), as estatísticas de precisão apontam que o modelo foi capaz de simular de forma adequada as vazões diárias, inclusive em anos de El-Niño e La-Niña, assim como foi capaz de simular os impactos hidrológicos decorrentes de alteração de uso do solo simuladas.

Já os resultados obtidos por Viola (2008) para a bacia hidrográfica do rio Aiuruoca (2.094 km²) foram publicados por Viola *et al.* (2009), tendo sido empregado também o modelo na sua versão distribuída por sub-bacias hidrográficas. Segundo Viola *et al.* (2009), a estatística empregada para análise indicou que o modelo foi capaz de simular o comportamento hidrológico da bacia.

Para Viola *et al.* (2009), as análises de precisão realizadas no estudo produziram resultados animadores com o modelo desenvolvido, demonstrando o potencial para aplicação como ferramenta preditiva do comportamento hidrológico da região, contudo, os autores reconheciam que o modelo ainda precisaria ser testado em outras bacias hidrográficas para que se pudesse concluir, de forma mais efetiva, sobre sua precisão.

Até então o modelo desenvolvido pelo grupo de pesquisadores consistia em uma complexa planilha eletrônica (Figura 3), em formato *Microsoft Office Excel*, cuja calibração dos parâmetros desconhecidos ou indiretamente mensuráveis era realizada de forma manual ou através da ferramenta *Solver*.

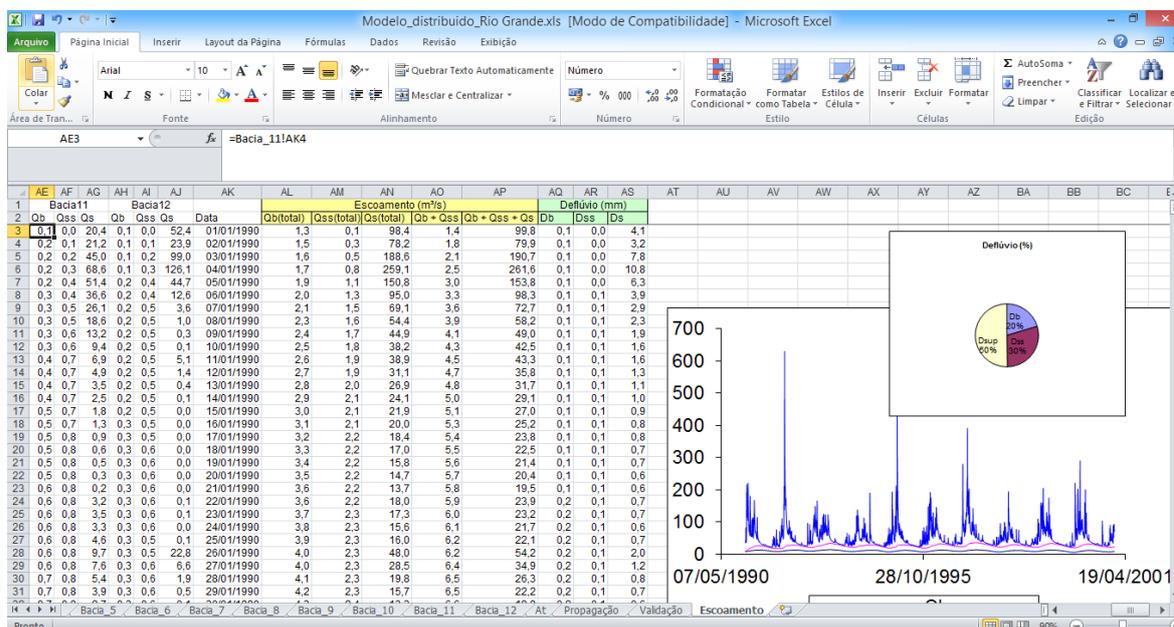


Figura 3 - Interface da primeira versão do modelo hidrológico, em planilha eletrônica *Microsoft Office Excel*, desenvolvida por Viola (2008)

Um ano depois do primeiro relato sobre o modelo, Beskow (2009) publicou sua Tese, na qual o apresentava sob a forma de um programa de computador (Figura 4), envolvendo várias adaptações e aprimoramentos; esta era a segunda

versão do modelo, o qual passaria a ser chamado de *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH).

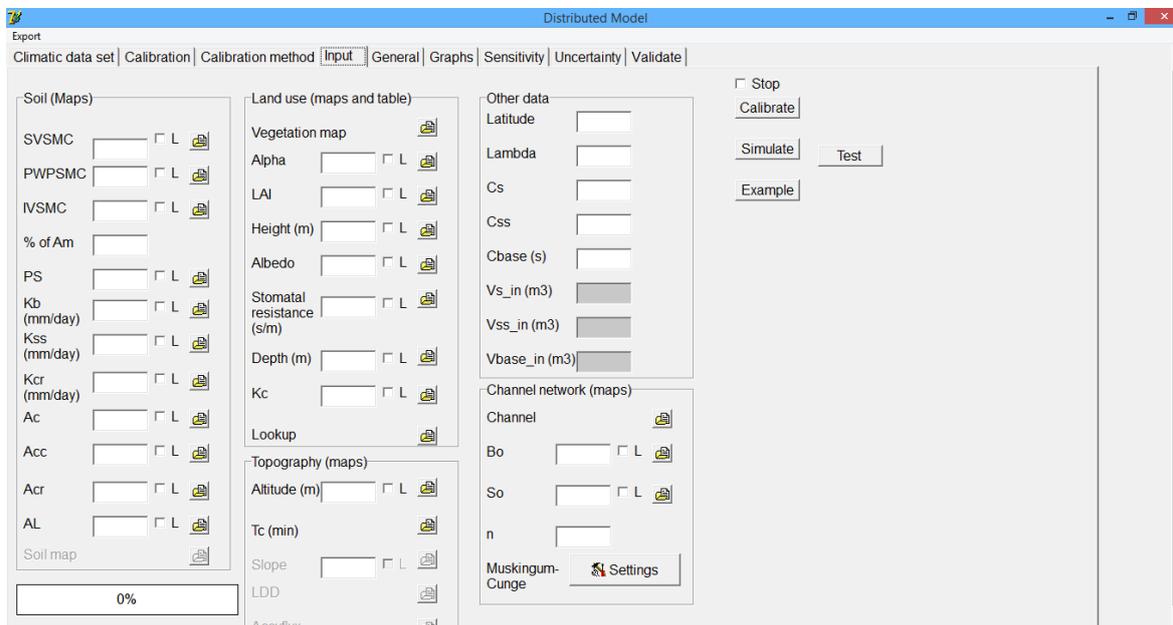


Figura 4 - Interface da segunda versão do modelo hidrológico, o *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH), desenvolvida por Beskow (2009)

O LASH, na sua segunda versão, é um modelo hidrológico chuva-vazão semiconceitual, determinístico, distribuído, de longo termo, fundamentado no método do CN Modificado (MISHRA *et al.*, 2006) para estimativa do escoamento superficial direto, na equação de Brooks & Corey, para os escoamentos sub-superficial e de base, e modelo do Muskingum-Cunge Linear para propagação hidráulica na rede de drenagem, como descrito em Tucci (2005).

Segundo Beskow, Mello e Norton (2011), a modelagem hidrológica no LASH possui três módulos básicos, ilustrados na Figura 5. Como o modelo apresenta uma abordagem distribuída, o primeiro módulo contempla o balanço hídrico, realizado em cada célula do *grid* representativo da bacia hidrográfica, estimando as lâminas de escoamento superficial, subsuperficial e de base que deixam a camada superior do solo. O segundo módulo visa o efeito de retardamento nos reservatórios, que é simulado no modelo pela passagem por reservatórios lineares simples, como descrito por Collischonn (2001). O terceiro módulo, por sua vez, realiza a propagação na calha fluvial pelo método vazão-vazão Muskingum-Cunge Linear, seguindo o recomendado por Tucci (2005).

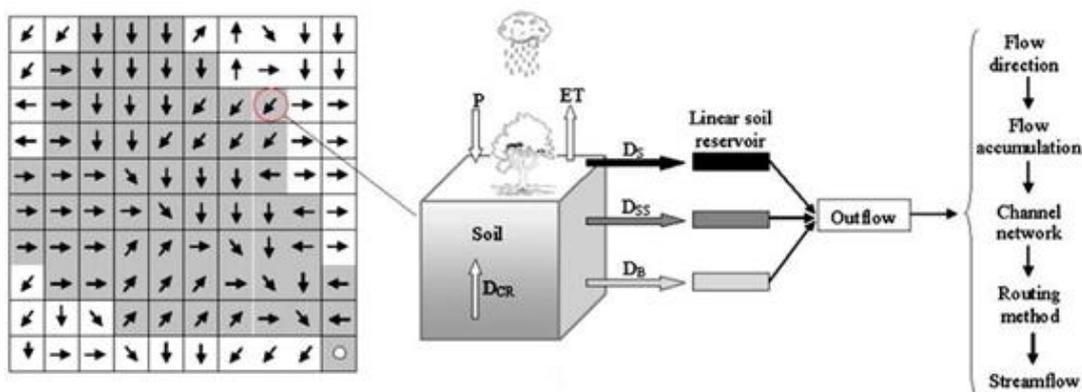


Figura 5 - Etapas da simulação na segunda versão do modelo hidrológico LASH
 Fonte: BESKOW et al. (2011b).

Os parâmetros desconhecidos, ou indiretamente mensuráveis em escala de bacia hidrográfica, são calibrados no modelo LASH através do algoritmo Shuffled Complex Evolution (SCE-UA), desenvolvido por Duan, Sorooshian e Gupta (1992). Este método global de otimização de parâmetros executa a rotina de simulação hidrológica, compilando os bancos de dados espacial, de solo, de uso do solo e meteorológico, até convergir para um conjunto adequado de valores que representem os processos simulados.

Em Beskow (2009), a segunda versão do modelo LASH foi avaliada na bacia hidrográfica do ribeirão Jaguara (32 km²), localizada em Minas Gerais. O autor constatou, calibrando seis parâmetros desconhecidos para a área de estudo, que o método de otimização SCE-UA foi eficiente na localização de parâmetros ótimos e apresentou uma convergência bastante rápida. Além disso, foi possível verificar, com base nas estatísticas de precisão, que o modelo tinha grande potencial para ser aplicado para a geração de séries de vazões máximas, mínimas e de curvas de permanência, podendo ser empregado com sucesso em bacias hidrográficas de tamanho similar à analisada.

Após os estudos de Viola (2008), Mello *et al.* (2008), Viola *et al.* (2009) e Beskow (2009), o modelo LASH vem sendo aplicado com sucesso em bacias hidrográficas brasileiras de diferentes tamanhos, como pode ser observado em Beskow, Mello e Norton (2011), Beskow *et al.* (2011), Viola *et al.* (2012), Beskow, Norton e Mello (2013), Viola *et al.* (2014), Viola *et al.* (2015) e Beskow *et al.* (2016).

Beskow, Mello e Norton (2011) e Beskow *et al.* (2011) publicaram os excelentes resultados obtidos por Beskow (2009). No primeiro estudo os autores descreveram a segunda versão do modelo hidrológico LASH, buscando enfatizar seus componentes e parâmetros, bem como suas potencialidades. Beskow, Mello e Norton (2011) analisaram a sensibilidade, a redução do intervalo de parâmetros e as incertezas anteriormente à fase de calibração, empregando metodologias específicas e a base de dados da bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará, a fim de simular a vazão total média diária. Já o segundo estudo teve como objetivo calibrar e validar o modelo LASH para a bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará, cuja classe de solo predominante é Latossolo. Além disso, Beskow *et al.* (2011) também verificaram a acurácia do método de otimização dos parâmetros desconhecidos ou indiretamente mensuráveis. Os autores constataram que o algoritmo SCE-UA apresentou bom desempenho e que o modelo LASH foi capaz de prever adequadamente o hidrograma, inclusive picos e vazões de estiagem, tanto no período de calibração quanto de validação, concluindo ser uma importante ferramenta de gestão dos recursos hídricos.

Viola *et al.* (2012) calibraram e validaram a primeira versão do modelo LASH para uma sub-bacia hidrográfica do rio da Lontra (3.470 km²), afluente direto do baixo rio Araguaia, localizada numa importante região ecológica do norte do Tocantins. Os autores aplicaram medidas estatísticas para avaliar o erro de estimativa das principais vazões de referência obtidas da curva de permanência e o desempenho na simulação contínua de vazões. Foi constatado que o modelo apresentou bom desempenho nas etapas de calibração e validação, e que as curvas de permanência simuladas mostraram forte aderência às observadas, com pequenos erros de estimativa, evidenciando a aplicabilidade do modelo LASH para gestão e planejamento dos recursos hídricos no estado do Tocantins.

A acurácia da primeira versão do modelo LASH foi também verificada por Viola *et al.* (2013) quando da simulação do regime hidrológico das bacias hidrográficas dos rios Aiuruoca, Grande, Sapucaí e Verde, as quais compõem a região de cabeceira da bacia do rio Grande, no sul do estado de Minas Gerais. As curvas de permanência simuladas e observadas foram condizentes, no entanto, apresentaram alguns erros de estimativa de eventos extremos de precipitação. Segundo os autores, o modelo hidrológico LASH pode ser empregado para

simulação hidrológica nas referidas bacias hidrográficas, sob diferentes cenários de uso do solo e de condições ambientais e meteorológicas, sendo uma importante ferramenta para planejamento e gestão dos recursos hídricos na região.

Beskow *et al.* (2013) empregaram a segunda versão do modelo hidrológico LASH na bacia hidrográfica do ribeirão Jaguara, analisando a influência da alteração de uso do solo na simulação das vazões mínimas, máximas e médias, comparando o cenário atual com dois cenários representativos de tendências regionais. Os resultados encontrados por Beskow *et al.* (2013), quando da substituição de 100% da área coberta com pastagem pelo cultivo de eucalipto, apontam para uma situação preocupante, visto que a produção de água na bacia poderá ser reduzida, impactando negativamente sobre o reservatório de uma importante usina hidrelétrica da região, a UHE de Camargos/CEMIG. Em relação ao outro cenário analisado, este não apresentou alterações pronunciadas quando comparado ao cenário atual.

Viola *et al.* (2014), empregando a primeira versão do modelo LASH, buscaram analisar o impacto da mudança no uso do solo sobre o regime hidrológico na região de cabeceira da bacia hidrográfica do rio Grande, sul de Minas Gerais. Os autores traçaram 5 cenários de tendência de uso do solo: 1) reflorestamento com eucalipto cobrindo cerca de 20% da área de campo corrente; 2) reflorestamento com eucalipto cobrindo cerca de 50% da área de campo corrente; 3) reflorestamento com eucalipto cobrindo cerca de 100% da área de pastagem, mas apenas em sub-bacias onde esta tendência é predominante; 4) desmatamento de 30% dos remanescentes florestais da Serra da Mantiqueira para cultivo de pastagem; e 5) desmatamento de 70% dos remanescentes florestais da Serra da Mantiqueira para cultivo de pastagem. Eles concluíram que, sob os cenários 1, 2 e 3, o escoamento seria reduzido, enquanto que sob os cenários 4 e 5, a vazão aumentaria, indicando que a alteração no uso do solo pode acarretar em maior propensão a cheias em bacias hidrográficas, além de outros riscos associados ao aumento do escoamento superficial.

Viola *et al.* (2015) avaliaram as possíveis alterações no regime hidrológico da região de cabeceira da bacia hidrográfica do rio Grande sob um cenário de mudanças climáticas futuras, empregando a primeira versão do modelo

hidrológico LASH e o modelo climático global HadCM3, com regionalização pelo modelo Eta/CPTEC, para o cenário A1B. O primeiro período analisado apresentou pequena redução sobre o escoamento total anual, no entanto, os dois períodos seguintes apontaram para um forte incremento sobre a vazão. Segundo os autores, a redução das chuvas no final do inverno, que é o período seco da região, e no início da primavera, poderá causar uma mudança na dinâmica de recarga subterrânea, afetando o fluxo de escoamento de base e a disponibilidade hídrica. Contudo, eles relatam que o aumento das chuvas durante o verão, que é a estação chuvosa, provocaria um aumento do escoamento superficial direto, modificando assim o regime de cheias dos rios da região.

Beskow *et al.* (2016) calibraram e validaram a segunda versão do modelo LASH para a bacia hidrográfica do arroio Fragata, sul do Rio Grande do Sul. Os autores estimaram vazões médias diárias e, a partir dessa variável, indicadores anuais e a curva de permanência. As medidas estatísticas empregadas permitiram constatar que o modelo foi adequado para a bacia em análise, produzindo resultados satisfatórios para os indicadores anuais, especialmente em termos de vazões máximas e médias, assim como para a curva de permanência. Beskow *et al.* (2016) ressaltam ainda, com base nos resultados por eles apresentados, que o modelo LASH pode ser empregado para gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas com uma base de dados limitada e sob condições similares de solo e uso do solo.

Os estudos conduzidos pelo grupo de pesquisa, da concepção ao desenvolvimento da terceira versão do modelo hidrológico LASH, estão, em síntese, apresentados na Figura 6.

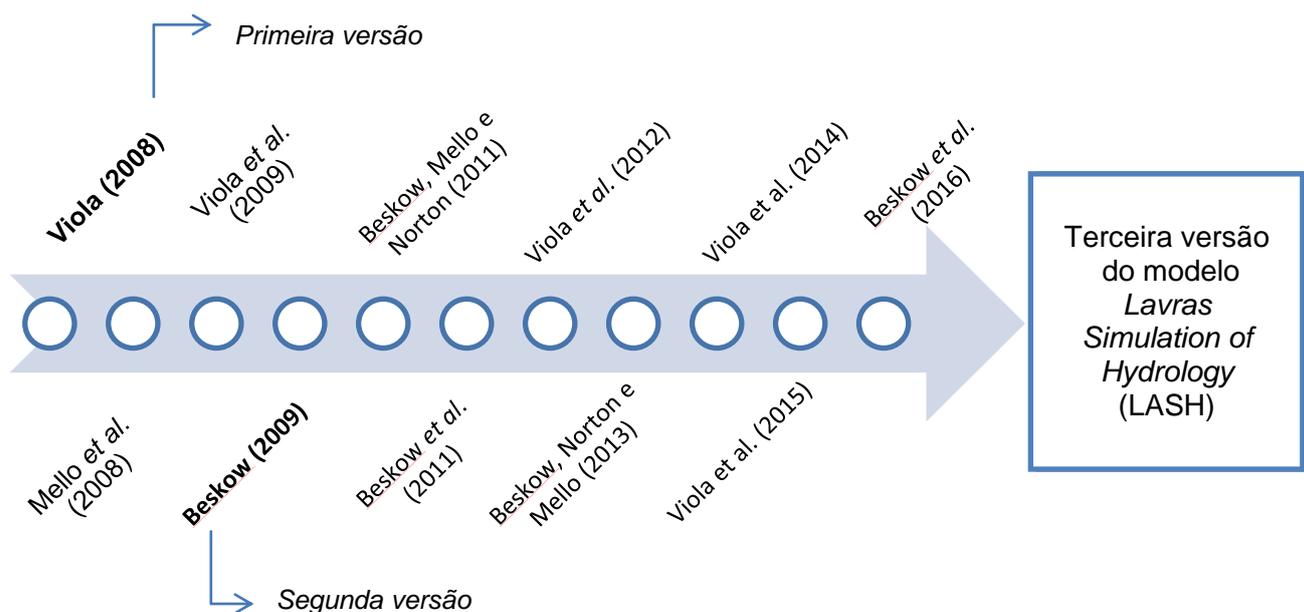


Figura 6 - Modelo hidrológico LASH da concepção e avaliação ao desenvolvimento da terceira versão

O modelo hidrológico LASH, na sua terceira versão, a que se propõe este estudo, vem sendo desenvolvido através de uma parceria entre as Universidades Federais de Lavras e de Pelotas e a Universidade de Purdue. Frente ao exposto, este Capítulo objetiva desenvolver e apresenta sua terceira versão, foi idealizada para ser um modelo chuva-vazão semiconceitual, determinístico, de longo termo, semidistribuído por sub-bacias hidrográficas.

Os principais aprimoramentos projetados para esta versão podem ser visualizados na Figura 7, e concernem ao aprimoramento computacional da segunda versão do modelo e ao desenvolvimento de módulos contemplando diferentes etapas da simulação hidrológica no ambiente do LASH. O objetivo deste

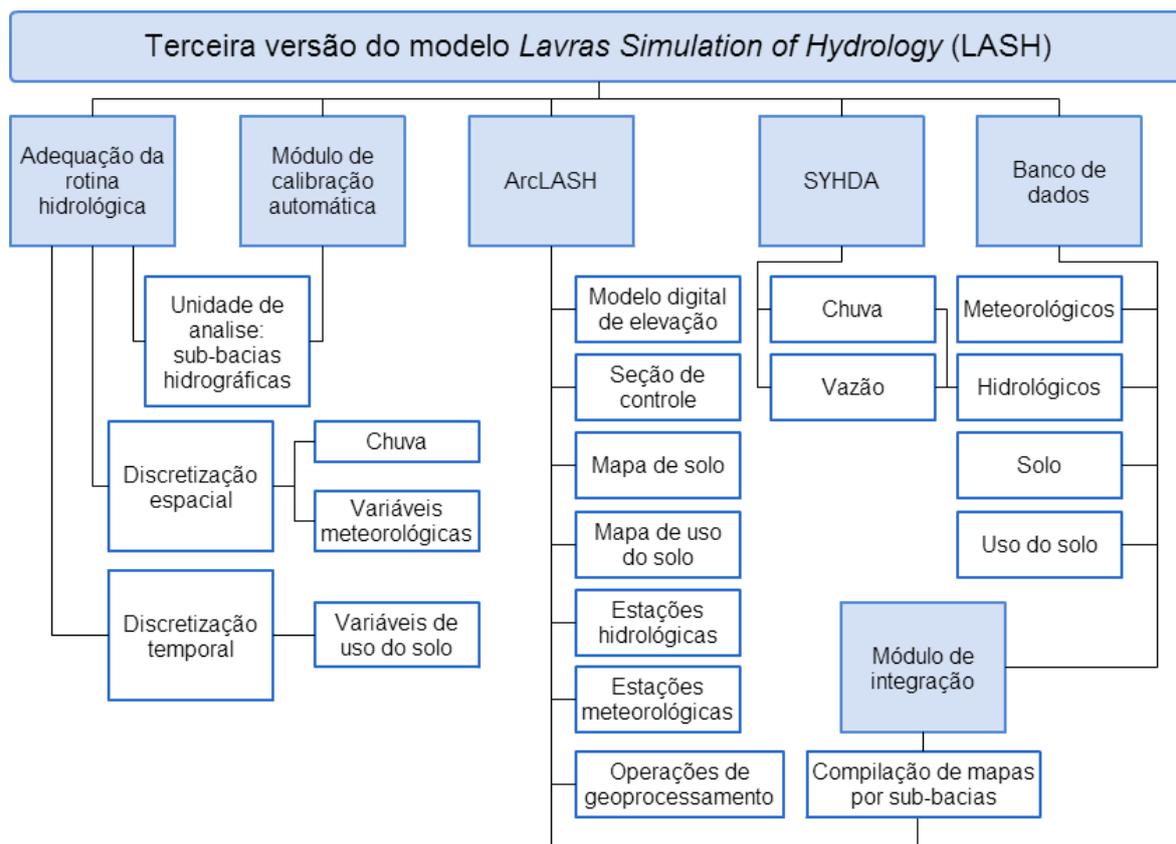


Figura 7 - Organograma representando os principais aprimoramentos da terceira versão do modelo hidrológico LASH

2 Material e Métodos

2.1. Adequação da rotina hidrológica

Foram realizadas adaptações na rotina de simulação hidrológica da segunda versão do modelo LASH com vistas à discretização espacial por sub-bacias hidrográficas, uma vez que esta versão destina-se à simulação por células de tamanho regular (*grid*). O conceito central da simulação hidrológica no LASH continuou sendo a equação do balanço hídrico, entretanto, os algoritmos foram alterados a fim de que cada processo hidrológico fosse simulado simultaneamente por sub-bacia hidrográfica.

2.1.1. Balanço hídrico do solo

Em modelos de simulação hidrológica, o armazenamento atual de água no solo (A_t) é uma variável de estado primordial, segundo Viola (2008), haja vista que atua diretamente na geração das lâminas de escoamento subterrâneo, subsuperficial e superficial.

No modelo hidrológico LASH, a estimativa de A_t é realizada através do balanço hídrico do solo, tendo como unidade de análise a sub-bacia hidrográfica e o passo de simulação diário, empregando as seguintes equações:

$$\Delta A = (P + D_{CR} - ET_R - D_B - D_{SS} - D_{SUP}) \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$A_t = A_{t-1} + \Delta A \quad (2)$$

em que ΔA é a variação de armazenamento de água no solo (mm), P é a precipitação média (mm), descontada a interceptação, D_{CR} é a ascensão capilar (mm), ET_R é a evapotranspiração real (mm), D_B é a lâmina de escoamento subterrâneo (mm), D_{SS} é a lâmina de escoamento subsuperficial (mm), D_{SUP} é a

lâmina de escoamento superficial (mm), Δt é o intervalo de tempo de 1 dia, A_t é o armazenamento atual de água no solo (mm) e A_{t-1} é o armazenamento de água no solo (mm) no intervalo de tempo imediatamente anterior à t .

A condição inicial de A_t representa uma incerteza para a simulação hidrológica, pois não existem dados monitorados, fato este que levou a adotar um valor inicial de 50% da capacidade de armazenamento de água no solo (A_m) média de cada sub-bacia hidrográfica. Este percentual foi também empregado por Ribeiro Neto (2006) quando da simulação hidrológica na bacia do rio Madeira através do MGB-IPH, justificando o valor pelo fato de que o período de aquecimento do modelo se iniciava em janeiro e, mesmo este mês apresentando altos índices pluviométricos, a umidade do solo não acompanhava a distribuição temporal da precipitação.

2.1.2. Interceptação

A interceptação consiste na retenção, acima da superfície do solo, de uma parcela do total precipitado, geralmente ocorrendo devido à vegetação (TUCCI, 2009). A estimativa da parcela de precipitação que é interceptada pela cobertura vegetal é, segundo Mello e Silva (2013), bastante relevante. O modelo LASH, empregando a sub-bacia hidrográfica como unidade de análise, estima a Capacidade do Reservatório de Interceptação (CRI) de forma semelhante ao modelo MGB-IPH, considerando a CRI como uma função linear do índice de área foliar (IAF):

$$CRI = \alpha \cdot IAF \quad (3)$$

em que α é a capacidade máxima de armazenamento de água por unidade de área das folhas, sendo fixada em 0,2 mm, conforme sugerido por Dickinson (1984) e Wigmosta, Vail e Lettenmaier (1994).

Uma vez definida a CRI da sub-bacia hidrográfica, o modelo LASH realiza o balanço hídrico no reservatório de interceptação:

- se inexistir lâmina armazenada no reservatório no tempo $t-1$ (L_{t-1}) e a precipitação total no tempo t (P_t) for superior à CRI, a lâmina

armazenada no tempo t (LI_t) passa a ser a própria CRI, assim como quando LI_{t-1} acrescida à P_t for superior à CRI.

$$LI_t = CRI \quad (4)$$

- se inexistir lâmina armazenada no reservatório no tempo $t-1$ (LI_{t-1}) e a lâmina total precipitada no tempo t (P_t), for inferior à CRI, a lâmina armazenada no tempo t (LI_t) é igual à P_t :

$$LI_t = P_t \quad (5)$$

- se a lâmina armazenada no reservatório no tempo $t-1$ (LI_{t-1}), acrescida da lâmina total precipitada no tempo t (P_t), for inferior à CRI, a lâmina armazenada no tempo t (LI_t) é dada por:

$$LI_t = LI_{t-1} + P_t \quad (6)$$

Em seguida, é estimada a parcela da lâmina de precipitação (P) que atingiu o solo no tempo t :

$$P = P_t - (LI_t - LI_{t-1}) \quad (7)$$

onde LI_t é a lâmina interceptada durante o intervalo de tempo (mm), LI_{t-1} é a lâmina no reservatório de interceptação ao início do intervalo de tempo (mm), P_t é a precipitação total (mm) e P é a precipitação descontada a interceptação (mm).

Ao final do tempo t o modelo LASH estima o esvaziamento do reservatório de interceptação, descontando da lâmina armazenada (LI_t) a evapotranspiração potencial (ET_P).

2.1.3. Geração de escoamento superficial direto

No modelo hidrológico LASH, a estimativa da parcela de escoamento superficial direto foi fundamentada no método Curva-Número (CN) (SCS, 1971), desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS – atual Natural Resources Conservation Services do United States Department of Agriculture) e adaptado por Mishra *et al.* (2006), denominado de CN Modificado.

O método CN Modificado consiste em um aperfeiçoamento do método original, no sentido de melhor relacionar a abstração inicial (I_a) e o potencial de armazenamento de água no solo (S), considerando a umidade antecedente (M) como função da precipitação acumulada nos últimos 5 dias (P_5). A estimativa do escoamento superficial direto por este método se dá pelas seguintes equações:

$$D_{\text{SUP}} = \frac{(P_t - I_a) \cdot (P_t - I_a + M)}{P_t - I_a + M + S} \quad (8)$$

$$M = 0,5 \cdot (-(1 + \lambda) \cdot S) + \sqrt{(1 - \lambda)^2 \cdot S^2 + 4 \cdot P_5 \cdot S} \quad (9)$$

$$I_a = \frac{\lambda \cdot S^2}{S + M} \quad (10)$$

$$S = (\theta_s - \theta_A) \cdot h \quad (11)$$

$$S = A_m - A_t \quad (12)$$

Onde D_{SUP} é a lâmina de escoamento superficial direto (mm), P_t é a precipitação total que atinge o solo (mm), I_a é a abstração inicial (mm), M é a umidade antecedente (mm), S corresponde ao armazenamento potencial de água no solo compreendido entre o conteúdo de água no solo no ponto de saturação (θ_s) e o conteúdo atual de água no solo (θ_A), podendo ser estimado pelas equações (11 e (12 em função de A_m e A_t . Assim, λ é o coeficiente de abstração inicial, que de acordo com Mishra *et al.* (2006), pode variar de 0 a 0,5.

2.1.4. Geração de escoamento subsuperficial

A parcela de escoamento subsuperficial é estimada pelo modelo LASH seguindo o prescrito em Rawls *et al.* (1993). Desta forma, quando o armazenamento de água no solo no tempo t (A_t) for inferior ao limiar de armazenamento a partir do qual ocorre geração de escoamento subsuperficial (A_{cc}), essa parcela será nula, contudo, se for superior, é estimada pela seguinte equação:

$$D_{SS} = K_{SS} \cdot \left(\frac{A_t - A_{CC}}{A_m - A_{CC}} \right)^{\left(3 + \frac{2}{Pr}\right)} \quad \text{se } A_t \geq A_{CC} \quad (13)$$

em que D_{SS} é o escoamento subsuperficial (mm), K_{SS} é a condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial (mm.h^{-1}), calibrável, Pr é o índice de porosidade do solo, considerado fixo e igual à 0,4, A_{CC} representa o armazenamento de água no solo a partir do qual ocorre escoamento subsuperficial, considerado fixo e igual à 10% da capacidade de armazenamento de água no solo (A_m), como empregado por Collischonn (2001) e Ribeiro Neto (2006).

2.1.5. Geração de escoamento subterrâneo

A geração de escoamento subterrâneo, a qual é função da drenagem natural do aquífero superficial, é estimada no modelo hidrológico LASH com base em Rawls *et al.* (1993). Sendo assim, quando o armazenamento de água no solo no tempo t (A_t) for inferior ao limiar de armazenamento a partir do qual ocorre geração de escoamento subterrâneo (A_c), essa parcela será nula, no entanto, se superior, é estimada por:

$$D_B = K_B \cdot \left(\frac{A_t - A_c}{A_m - A_c} \right) \quad \text{se } A_t \geq A_c \quad (14)$$

em que D_B é o escoamento subterrâneo, em mm.dia^{-1} , K_B é a condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo, calibrável, em mm.dia^{-1} , e A_c representa o armazenamento de água no solo a partir do qual ocorre escoamento subterrâneo, considerado fixo e igual à 1% da capacidade de armazenamento de água no solo (A_m).

2.1.6. Evapotranspiração

O módulo de evapotranspiração do modelo hidrológico LASH foi fundamentado em dados meteorológicos normalmente disponíveis, aplicados à

metodologia de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998) para estimativa de uma série histórica de evapotranspiração da cultura (ET_c):

$$ET_c = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \left(\frac{86400 \cdot \gamma \cdot \varepsilon}{T_{Kv} \cdot R \cdot r_a}\right) \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (15)$$

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left[0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T+237,3}\right)\right]}{(T + 237,3)^2} \quad (16)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (17)$$

$$R_{ns} = (1 - a) \cdot R_s \quad (18)$$

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left(\frac{T_{máx,K}^4 + T_{mín,K}^4}{2}\right) \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left(1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35\right) \text{ se } R_s \leq R_{so} \quad (19)$$

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left(\frac{T_{máx,K}^4 + T_{mín,K}^4}{2}\right) \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \text{ se } R_s > R_{so} \quad (20)$$

$$e_a = e_s \cdot \frac{UR}{100} \quad (21)$$

$$e_s = \frac{\left[0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{mín}}{T_{mín}+237,3}\right)\right] + \left[0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{máx}}{T_{máx}+237,3}\right)\right]}{2} \quad (22)$$

$$R_{so} = [0,75 \cdot (0,00002 \cdot z)] \cdot R_a \quad (23)$$

$$R_a = \frac{(24 \cdot 60)}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [\omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s)] \quad (24)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) \quad (25)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (26)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right) \quad (27)$$

$$\gamma = 0,000665 \cdot P \quad (28)$$

$$P = 101,3 \cdot \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293}\right)^{5,26} \quad (29)$$

$$T_{Kv} = 1,01 \cdot (T + 273) \quad (30)$$

$$r_a = \frac{6,25}{U_{10}} \cdot \left[\text{LN}\left(\frac{10}{h/10}\right) \right]^2 \quad \text{se } h \leq 10\text{m} \quad (31)$$

$$r_a = \frac{94}{U_{10}} \quad \text{se } h > 10\text{m} \quad (32)$$

$$U_{10} = v_{\text{emp}} \cdot \frac{\text{LN}\left(\frac{10}{h/10}\right)}{\text{LN}\left(\frac{2}{h/10}\right)} \quad (33)$$

$$v_{\text{emp}} = v \quad \text{se } h_{\text{estação}} = 2\text{m} \quad (34)$$

$$v_{\text{emp}} = \frac{v}{\frac{4,87}{\text{LN}[(67,8 \cdot h_{\text{estação}}) - 5,42]}} \quad \text{se } h_{\text{estação}} \neq 2\text{m} \quad (35)$$

sendo ET_C a evapotranspiração da cultura (mm), Δ a declividade da curva de pressão de saturação da água ($\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$) na temperatura do ar T ($^\circ\text{C}$), R_n a radiação líquida ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$), R_{ns} a radiação de ondas curtas ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$), R_{nl} a radiação de ondas longas ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$), a o albedo, R_s a radiação solar ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$), σ a constante de Stefan-Boltzmann ($4,903\cdot 10^{-9} \text{ MJ}\cdot\text{K}^{-4}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$), $T_{\text{máx},K}$ a temperatura máxima (K), $T_{\text{mín},K}$ a temperatura mínima (K), e_a a pressão atual do vapor d'água (kPa), R_{so} a radiação de ondas curtas que ocorre quando não há nuvens no céu, ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$), e_s a pressão de saturação do vapor d'água (kPa), UR a umidade relativa (%), $T_{\text{mín}}$ a temperatura mínima ($^\circ\text{C}$), $T_{\text{máx}}$ a temperatura máxima ($^\circ\text{C}$), z é a altitude (m a.n.m), R_a é a radiação que atinge o topo da atmosfera ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$), G_{sc} a constante solar ($0,0820 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$), d_r a distância relativa inversa Terra-Sol (adimensional), ω_s o ângulo horário ao nascer ou pôr do sol (radianos), φ a latitude (radianos), δ a declinação solar (radianos), J o número do dia no calendário Juliano, G é o fluxo de energia para o solo ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$), considerado nulo, Υ a constante psicrométrica ($\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$), P a pressão atmosférica (kPa), ε uma razão do peso molecular do vapor d'água/ar seco (0,622, adimensional), T_{Kv} a temperatura virtual (K), T a temperatura média ($^\circ\text{C}$), R a constante de gás específico, r_a a resistência aerodinâmica ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$), h é a altura da vegetação (m), U_{10} é a velocidade do vento a 10 m da superfície ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), v é a velocidade do vento média diária ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), v_{emp} é a velocidade do vento empregada ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), $h_{\text{estação}}$ é a altura (m) da estação meteorológica, a partir da superfície do terreno, e r_s a resistência estomatal ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$).

Para a estimativa da evapotranspiração real (ET_R), o modelo adota metodologia semelhante àquela abordada no modelo hidrológico NRM3 Streamflow (NOTTER *et al.*, 2007). Quando não há condições ótimas de umidade ou nutrientes, a evapotranspiração real da cultura (ET_R) é, conseqüentemente, menor ou no máximo igual à ET_C , sendo possível expressar a relação entre ambas por meio de um coeficiente que depende da umidade do solo (K_S) (Allen *et al.* (1998); Pereira, Villa Nova e Sediyaama (1997); Bernardo, Soares e Mantovani (2005)):

$$ET_R = ET_C \cdot K_S \quad (36)$$

O coeficiente K_S é determinado no LASH considerando um decaimento exponencial da relação entre ET_R e ET_C a partir de um armazenamento limite de água no solo (A_L), pela seguinte equação adaptada de Bernardo, Soares e Mantovani (2005):

$$K_S = \frac{\text{Ln}(A_t - A_{PMP})}{\text{Ln}(A_L - A_{PMP})} \quad \text{se } A_t < A_L \quad (37)$$

$$K_S = 1 \quad \text{se } A_t \geq A_L \quad (38)$$

em que K_S é o coeficiente de umidade do solo, adimensional, A_L é o armazenamento limite a partir do qual ocorre decréscimo da evapotranspiração, em mm, e A_{PMP} é o armazenamento de água no solo no ponto de murcha permanente, em mm.

O comportamento de K_S em função do armazenamento atual de água no solo (A_t) pode ser visualizado na Figura 8. No modelo LASH, A_{PMP} e A_L são considerados equivalentes à, respectivamente, 10 e 50% da capacidade de armazenamento de água no solo (A_M), seguindo critérios adotados por Shuttleworth (1993).

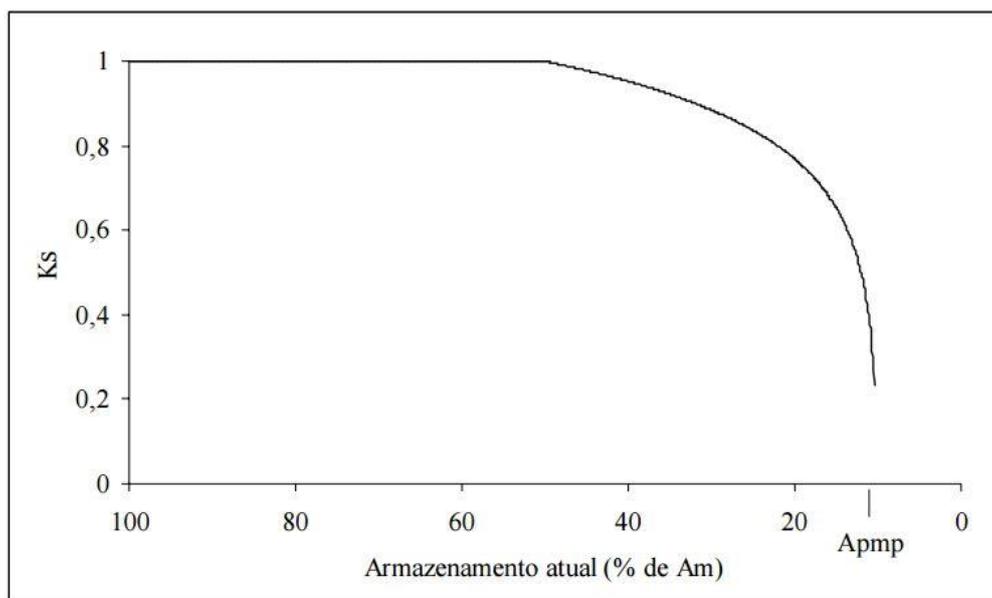


Figura 8 - Comportamento do fator K_S em função do armazenamento atual de água no solo e das equações 37 e 38
Fonte: Viola (2008)

2.1.7. Propagação nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo

Uma vez quantificados D_{SUP} (Equação (8)), D_{SS} (Equação (13)) e D_B (Equação (14)), o modelo converte cada componente do escoamento em vazão, empregando três reservatórios lineares em cada sub-bacia hidrográfica, a saber: o superficial, o subsuperficial e o subterrâneo (Collischonn, 2001; Tucci, 2005). De acordo com Viola (2011), isto se faz necessário para simular o retardamento dos diferentes componentes do escoamento nas sub-bacias hidrográficas, antes destes atingirem a rede de drenagem. O autor ressalta ainda que, embora o método dos reservatórios lineares tenha uma abordagem simplificada do processo envolvido, sua aplicação tem proporcionado resultados satisfatórios, como observa-se em Beskow (2009), Collischonn (2006), Mello *et al.* (2008) e Zhou *et al.* (2006).

A vazão de saída dos reservatórios lineares superficial, subsuperficial e subterrâneo é dada por:

$$Q_{SUP} = \frac{D_{SUP} \cdot A_{sub-bacia}}{C_S \cdot T_c} = \frac{V_{SUP}}{C_{SUP} \cdot T_c} \quad (39)$$

$$Q_{SS} = \frac{D_{SS} \cdot A_{sub-bacia}}{C_{SS} \cdot T_c} = \frac{V_{SS}}{C_{SS} \cdot T_c} \quad (40)$$

$$Q_B = \frac{D_B \cdot A_{sub-bacia}}{C_B} = \frac{V_B}{C_B} \quad (41)$$

em que Q_{SUP} , Q_{SS} e Q_B são as vazões de saída dos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo ($m^3 \cdot s^{-1}$), respectivamente, $A_{sub-bacia}$ é a área de drenagem de cada da sub-bacia (m^2), V_{SUP} , V_{SS} e V_B representam o volume nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrânea (m^3), respectivamente, T_c representa o tempo de concentração (s), estimado por Kirpich, e C_{SUP} , C_{SS} e C_B são parâmetros de calibração da propagação dos reservatórios superficial, subsuperficial e de base, respectivamente.

$$T_C = 57 \cdot L^{1,155} \cdot H^{-0,385} \quad (42)$$

em que T_C é o tempo de concentração da sub-bacia (min), L é o comprimento do curso d'água principal da sub-bacia (km) e H é o desnível do curso d'água principal (m), do ponto mais distante em relação ao exutório da sub-bacia.

Os parâmetros calibráveis C_{SUP} e C_{SS} são introduzidos devido às incertezas atreladas ao cálculo do tempo de concentração da sub-bacia hidrográfica. Quando analisada a parcela de escoamento subterrâneo, um parâmetro de mesmo propósito não é necessário, pois é possível analisar seu comportamento por meio de um período de recessão do hidrograma observado.

A vazão simulada a cada passo do modelo hidrológico, em cada sub-bacia hidrográfica, é, então, obtida pelo somatório das vazões de saída dos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo.

2.1.1. Propagação nos canais

Uma vez estimada a vazão no exutório de uma sub-bacia hidrográfica, esta atingirá a rede de drenagem à jusante, sendo propagada pelos canais até o próximo exutório, onde será acrescida da vazão estimada no exutório da sub-bacia à jusante.

A vazão simulada no exutório de cada sub-bacia hidrográfica é propagada pela rede de drenagem através do modelo Muskingum-Cunge Linear, o qual considera características do escoamento nos canais, como largura, declividade, rugosidade do leito, celeridade e vazão de referência.

A estrutura do modelo Muskingum-Cunge Linear, como descrito em Tucci (2005), é dada por:

$$Q_S^{t+1} = C_1 \cdot Q_e^t + C_2 \cdot Q_e^{t+1} + C_3 \cdot Q_S^t \quad (43)$$

em que Q_S refere-se à vazão de saída do trecho de propagação, Q_e à vazão de entrada no trecho e C_1 , C_2 e C_3 são constantes de propagação, obtidas por:

$$C_1 = \frac{2 \cdot K \cdot X + \Delta t}{2 \cdot K + (1 - X) + \Delta t} \quad (44)$$

$$C_2 = \frac{\Delta t - 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K + (1 - X) + \Delta t} \quad (45)$$

$$C_3 = \frac{2 \cdot K + (1 - X) - \Delta t}{2 \cdot K + (1 - X) + \Delta t} \quad (46)$$

em que Δt é o tempo de simulação, em segundos, e K e X são os parâmetros de tempo e espaço, respectivamente, obtidos a partir de relações físicas, expressas por:

$$X = \frac{1}{2} - \frac{Q_0}{B_0 \cdot S_0 \cdot c_0 \cdot \Delta x} \quad (47)$$

$$K = \frac{\Delta x}{c_0} \quad (48)$$

onde Q_0 é a vazão de referência ($m^3 \cdot s^{-1}$), B_0 e Δx são a largura e o comprimento, respectivamente, do trecho de propagação (m), S_0 é a declividade do canal (adimensional), c_0 é a celeridade cinemática ($m \cdot s^{-1}$), obtida por:

$$c_0 = \frac{5}{3} \cdot \frac{Q_0^{0,4} \cdot S_0^{0,3}}{n^{0,6} \cdot B_0^{0,4}} \quad (49)$$

em que n é o coeficiente de rugosidade de Manning ($s \cdot m^{-1/3}$), obtido com base na literatura.

De acordo com Tucci (2005), para que sejam obtidos os valores adequados de Δx e Δt , e por consequência K , X , C_1 , C_2 e C_3 , a seguinte igualdade deve ser atendida:

$$\frac{Q_0}{B_0 \cdot S_0 \cdot c_0} + 0,8 \cdot (c_0 \cdot \Delta t)^{0,8} \cdot \Delta x^{0,2} - \Delta x = 0 \quad (50)$$

O parâmetro B_0 foi obtido por modelos estatísticos, empregando informações de perfil dos postos fluviométricos e, tomando como variável explicativa, a área de drenagem, conforme descrito por Ribeiro Neto (2006).

Para estimar a vazão de referência Q_0 , adotou-se o procedimento semelhante àquele empregado por Collischonn (2001), o qual calculou Q_0 a partir de uma vazão de referência específica e da área de drenagem de cada trecho do rio. A vazão de referência específica deve abranger a magnitude de valores frequentemente alcançados durante as cheias (COLLISCHONN, 2001), o que levou à consideração de um valor correspondente três vezes a vazão específica de longo termo.

O coeficiente de rugosidade de Manning pode ser determinado com base nas características físicas da calha fluvial, contudo, diversos autores (COLLISCHONN, 2001; RIBEIRO NETO, 2006; COLLISCHONN, 2006) constataram baixa sensibilidade do modelo à variações deste parâmetro, fixando-o em 0,03, valor este que também foi empregado neste estudo.

2.2. System of Hydrological Data Acquisition and Analysis (SYHDA)

A compreensão da dinâmica dos processos que controlam o movimento da água, considerando a bacia hidrográfica como unidade de análise, envolve estudos hidrológicos complexos, que demandam o manuseio de uma grande quantidade de informações. Neste sentido, várias aplicações do modelo hidrológico LASH permitiram constatar, segundo Beskow *et al.* (2013), que o processamento e a análise de séries hidrológicas, seja manual ou empregando um software de propósito geral, é uma tarefa bastante laboriosa, podendo incorrer em erros humanos e influenciar na confiabilidade dos resultados obtidos.

Considerando o exposto, foi desenvolvido um módulo de aquisição e análise de dados hidrológicos, denominado de *System of Hydrological Data Acquisition and Analysis* (SYHDA). A ideia central de desenvolvimento do SYHDA consistiu-se de um módulo integrado ao modelo LASH, onde fosse possível elaborar o banco de dados hidrológicos necessários à simulação e explorar os

resultados de saída, reduzindo tempo e possíveis erros quando comparado aos procedimentos manuais.

O SYHDA foi totalmente planejado e desenvolvido no ambiente de programação Delphi[®]. De forma complementar, também foram utilizados o banco de dados Firebird[®], o gerenciador de banco de dados IBExpert[®] e o componente de conexão do banco de dados ZeosLib[®].

Os algoritmos implementados no SYHDA para aquisição de dados hidrológicos basearam-se, principalmente, nos padrões dos principais bancos existentes no Brasil, a saber: o HidroWeb - Sistema de Informações Hidrológicas, de responsabilidade da ANA, e o Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMet),

O portal do HidroWeb (Figura 9) compila dados referentes à cotas, vazões, chuvas, evaporação, perfil do curso d'água, resumos de descarga, qualidade da água e sedimentos, monitorados por diversas estações localizadas ao longo do território nacional (ANA, 2015). O acesso aos dados monitorados é realizado através do download de arquivos padrões no formato de texto (*.txt) ou *Microsoft DataBase* (*.MDB), que podem ser visualizados na Figura 10 e na Figura 11, respectivamente.

The image shows a screenshot of a web browser displaying the HidroWeb portal. The browser's address bar shows the URL hidroweb.ana.gov.br. The page title is "Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos". The main content area features a large map of Brazil with a grid overlay. To the left of the map is a navigation menu with the following items: Bem-vindo, Dados Hidrológicos, Mapas, Documentos, Glossário, Softwares, Publicações, Links, Bacias, Sub-Bacias, Rios, Estados, Municípios, Entidades, Estações, and Séries Históricas. To the right of the map is the ANA logo (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS) and the text "HidroWeb Sistema de Informações Hidrológicas". Below the map is a "Janela de Trabalho" section with radio buttons for "Única" and "Múltipla". At the bottom of the page is a banner with logos of partner organizations: CPRM (Serviço Geológico do Brasil), Epagri, AGUASPARANÁ (Instituto das Águas do Paraná), ICAM (INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS), Furnas, Eletronorte, ITAIPU BINACIONAL, hobeco, and COHIDRO (consultoria estudos projetos). Below the logos, it states "2190080 acessos registrados desde 1/02/2005".

Figura 9 - Portal HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas, um dos principais bancos de dados hidrológicos do Brasil

```

VAZOES.TXT - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
//-----
//
// Sistema de Informações Hidrológicas
// Versão Web 3.0
// © 2001 Agência Nacional de Águas (ANA)
//
// NivelConsistencia: 1 = Bruto, 2 = Consistido
// MediaDiaria: 0 = Não, 1 = Sim
// MetodoObtencaoVazoes: 1 = Curva de descarga, 2 = Transferência de vazões, 3 = Soma de vazões, 4 = ADCP
// Status: 0 = Branco, 1 = Real, 2 = Estimado, 3 = Duvidoso, 4 = Régua Seca
//
// Restrições da consulta:
// Código da Estação: 88850000
//-----
//EstacaoCodigo;NivelConsistencia;Data;Hora;MediaDiaria;MetodoObtencaoVazoes;Maxima;Minima;Media;DiaMaxima
88850000;1;01/01/2006;;1;1;3,306;0,54;1,0421;22;9;0;0;1;;0;1,6095;0,884;0,884;0,702;0,666;0,648;0,612;0,61
88850000;1;01/02/2006;;1;1;2,93;0,468;0,8121;25;17;0;0;1;;0;0,54;0,54;0,54;0,594;0,802;0,63;0,576;0,576;0,
88850000;1;01/09/2006;;1;1;116,5;0,802;7,3667;15;11;0;0;1;;0;1,294;1,294;1,294;1,212;1,212;1,212;1,048;1,0
88850000;1;01/10/2006;;1;1;6,7;0,684;1,4117;15;29;0;0;1;;0;1,376;1,376;1,294;1,13;1,253;1,679;1,499;1,171;0
88850000;1;01/11/2006;;1;1;66,9;0,648;4,3898;6;5;0;0;1;;0;0,761;0,843;0,72;0,684;0,648;47,96;9,015;4,9045;
88850000;1;01/12/2006;;1;1;31,3;0,468;4,0732;18;13;1;1;1;;0;1,212;0,966;0,884;0,802;0,72;0,648;0,648;0,576
88850000;1;01/01/2007;;1;1;21,1;0,884;2,3815;12;11;0;0;1;;0;1,8875;1,417;1,212;3,776;7,2;2,3045;1,8875;1,3
88850000;1;01/02/2007;;1;1;4,434;0,54;0,9345;6;15;0;0;1;;0;0,802;0,72;0,648;0,648;0,594;3,776;1,417;0,966;0
88850000;1;01/03/2007;;1;1;108;0,648;7,423;19;2;3;3;3;0;0;72;0,684;0,648;0,684;1,54;6,7;2,93;1,679;2,652;
88850000;1;01/04/2007;;1;1;67,3;1,376;9,679;3;23;0;0;1;;0;2,652;9,54;57,945;23,115;11,145;9,225;6,7;13,46;
88850000;1;01/05/2007;;1;1;157,8;0,966;8,853;5;30;0;0;1;;0;4,434;4,058;4,999;3,306;132,2;33,925;19,795;12,9
88850000;1;01/06/2007;;1;1;297;0,684;18,6378;15;9;3;3;3;0;0,966;1,048;0,966;0,72;0,72;0,72;0,72;0,72;0,72
88850000;1;01/07/2007;;1;1;114;1,54;9,411;8;30;0;0;1;;0;4,434;3,776;3,118;2,93;2,652;2,235;13,1;104,25;28,
88850000;1;01/09/2007;;1;1;84;1,818;8,0238;23;15;0;0;1;;0;6,133;6,322;7,2;8,1;5,4715;4,81;4,622;3,87;3,306
88850000;1;01/10/2007;;1;1;30,6;1,458;5,8064;10;26;0;0;1;;0;3,306;2,7215;2,5825;2,235;2,374;3,588;2,7215;2
88850000;1;01/11/2007;;1;1;66,5;0,802;5,4921;18;16;0;0;1;;0;28,125;9,225;6,6055;4,528;2,8605;2,096;1,818;1

```

Figura 10 - Arquivo de texto (*.txt) padrão para dados de chuva, obtido junto ao HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (ANA)

Vazoes - Microsoft Access

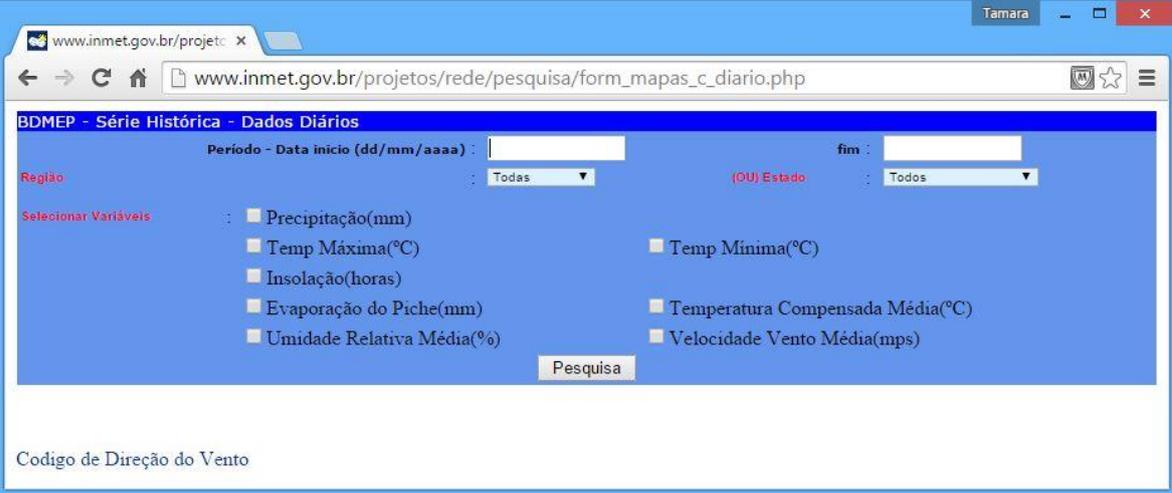
Importador

Objeto	EstacaoCodi	NivelConsis	Data	Hora	MediaDiaria	MetodoObt	Maxima	Minima	Media	DiaMaxima	DiaMinima
Rio	88850000	1	01/01/2006		3,306	0,54	1,0421	22			
RioEstado0101	88850000	1	01/02/2006		2,93	0,468	0,8121	25		1	
Sedimentos	88850000	1	01/09/2006		116,5	0,802	7,3667	15		1	
SubBacia	88850000	1	01/10/2006		6,7	0,684	1,4117	15		2	
Temp	88850000	1	01/11/2006		66,9	0,648	4,3898	6		1	
TEMP2	88850000	1	01/12/2006		31,3	0,468	4,0732	18		1	
TEMP3	88850000	1	01/01/2007		21,1	0,884	2,3815	12		1	
Uuario	88850000	1	01/02/2007		4,434	0,54	0,9345	6		1	
Vazoes	88850000	1	01/03/2007		108	0,648	7,423	19		1	
Vazoes24	88850000	1	01/04/2007		67,3	1,376	9,679	3		2	
Versao	88850000	1	01/05/2007		157,8	0,966	8,853	5		3	
Consultas	88850000	1	01/06/2007		297	0,684	18,6378	15		1	
Estacao_Chuvas	88850000	1	01/07/2007		114	1,54	9,411	8		3	
Estacao_Chuvas2	88850000	1	01/09/2007		84	1,818	8,0238	23		1	
Estacao_Chuvas24	88850000	1	01/10/2007		30,6	1,458	5,8064	10		2	
Estacao_Clima	88850000	1	01/11/2007		66,5	0,802	5,4921	18		1	
Estacao_Cotas	88850000	1	01/12/2007		0,72			1			
Estacao_Cotas24	88850000	1	01/01/2008		0,884			11			
Estacao_CurvaDescarga	88850000	1	01/02/2008		200	0,432	6,1422	2		2	
Estacao_Granulometria	88850000	1	01/03/2008		38			2			
Estacao_MedDesiADCP	88850000	1	01/04/2008		1,818			13			
Estacao_MedDesiMolin...	88850000	1	01/05/2008		30,6			28			
	88850000	1	01/06/2008		18,2	0,72	2,9982	9			
	88850000	1	01/07/2008		32,35	0,612	3,0815	22		1	
	88850000	1	01/08/2008		98	1,048	13,4265	20		1	
	88850000	1	01/09/2008		140	1,212	11,3228	7		2	

Registro: 1 de 593

Figura 11 - Arquivo Microsoft DataBase (*.MDB) padrão para dados de chuva, obtido junto ao HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (ANA)

O Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) (Figura 12) disponibiliza dados monitorados em estações convencionais do INMet, contemplando as seguintes variáveis meteorológicas: precipitação, temperatura do bulbo seco, temperatura do bulbo úmido, temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, insolação, direção e velocidade do vento (INMET, 2015). O arquivo padrão para obtenção dos dados tem o formato de texto (*.txt) e pode ser visualizado na Figura 13.



The image shows a web browser window displaying the BDMEP portal. The browser's address bar shows the URL `www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/form_mapas_c_diario.php`. The page title is "BDMEP - Série Histórica - Dados Diários". The interface includes a search form with the following elements:

- Período - Data início (dd/mm/aaaa):** A text input field for the start date.
- fim:** A text input field for the end date.
- Região:** A dropdown menu currently set to "Todas".
- (OU) Estado:** A dropdown menu currently set to "Todos".
- Selecionar Variáveis:** A list of checkboxes for selecting variables:
 - Precipitação(mm)
 - Temp Máxima(°C)
 - Insolação(horas)
 - Evaporação do Piche(mm)
 - Umidade Relativa Média(%)
 - Temp Mínima(°C)
 - Temperatura Compensada Média(°C)
 - Velocidade Vento Média(mps)
- Pesquisa:** A button to execute the search.

Below the search form, there is a label "Codigo de Direção do Vento" followed by a blank space.

Figura 12 - Portal do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), um dos principais bancos de dados meteorológicos do Brasil

```

Sem título - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
-----
BDMEP - INMET
-----
Estação      : PELOTAS - RS (OMM: 83985)
Latitude (graus) : -31.78
Longitude (graus) : -52.41
Altitude (metros): 13.00
Estação Operante
Início de operação: 01/01/1926
Período solicitado dos dados: 01/01/1900 a 31/12/2014
Os dados listados abaixo são os que encontram-se digitados no BDMEP
-----
Obs.: Os dados aparecem separados por ; (ponto e vírgula) no formato txt.
      Para o formato planilha XLS, siga as instruções
-----
Estacao;Data;Hora;Precipitacao;
83985;02/01/1961;1200;0;
83985;03/01/1961;1200;0;
83985;04/01/1961;1200;5.8;
83985;05/01/1961;1200;0;
83985;06/01/1961;1200;5.4;
83985;07/01/1961;1200;0;
83985;08/01/1961;1200;0;
83985;09/01/1961;1200;0;
83985;10/01/1961;1200;21.6;
83985;11/01/1961;1200;0;
83985;12/01/1961;1200;0;
83985;13/01/1961;1200;0;
83985;14/01/1961;1200;0;
83985;15/01/1961;1200;0;
83985;16/01/1961;1200;0;
83985;17/01/1961;1200;7.8;
83985;18/01/1961;1200;7;

```

Figura 13 - Arquivo de texto (*.txt) padrão para dados de chuva, obtido junto ao Banco de Dados de Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

De forma mais específica, o módulo de aquisição, conforme o fluxograma apresentado Figura 14, foi fundamentado nos dados pluviométricos (*.MDB) e fluviométricos (*.MDB), obtidos junto ao HidroWeb, e nos dados pluviométricos (*.txt) obtidos junto ao INMET, considerando a escala de tempo diária, para ambos os casos. Além disso, foi estruturada a aquisição de um arquivo padronizado pelo usuário para uma estação qualquer, podendo conter dados de chuva ou vazão, no formato *Microsoft Office Excel* (*.xls).

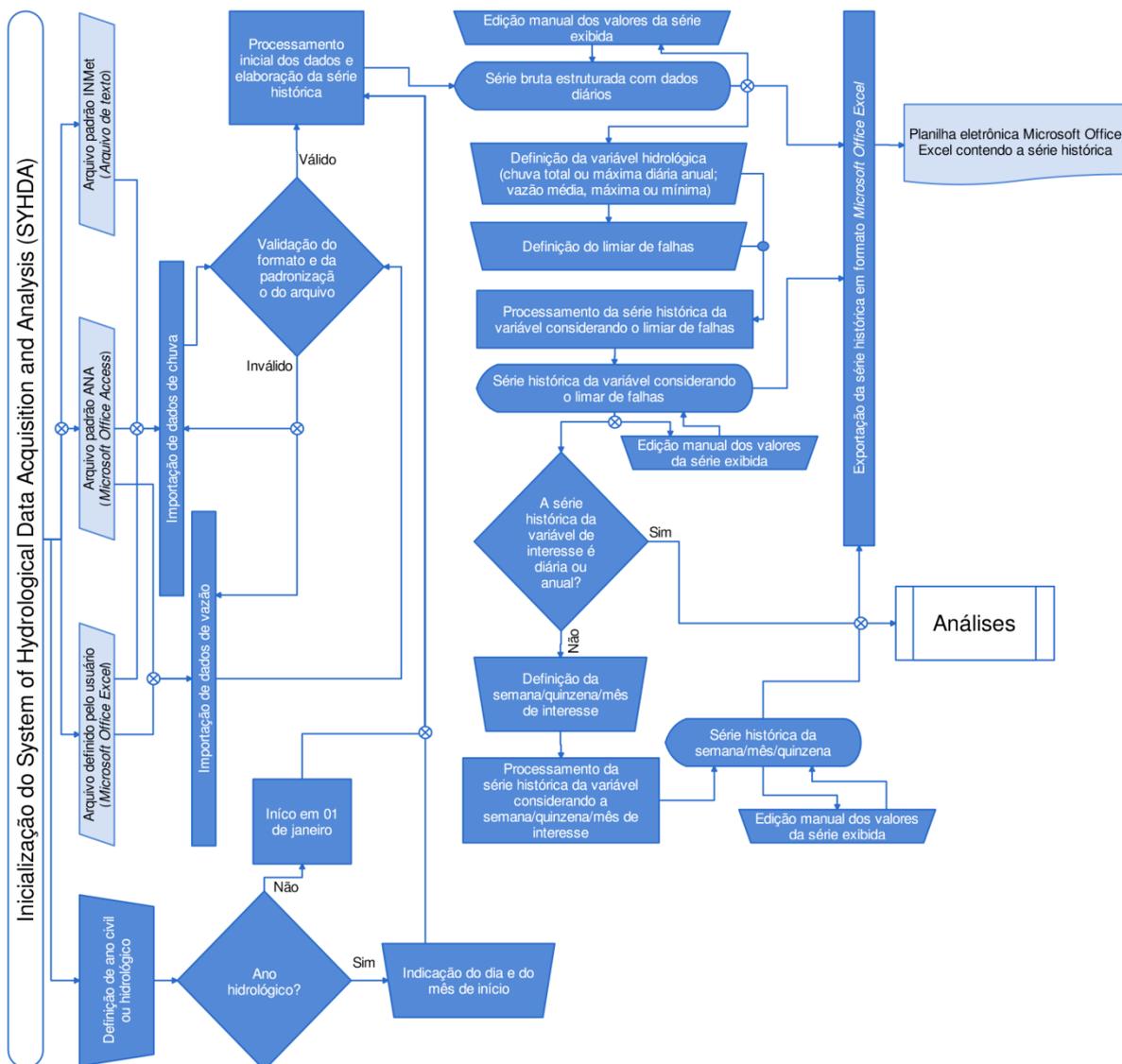


Figura 14 - Fluxograma de inicialização do *System of Hydrological Data Acquisition and Analysis* (SYHDA)

Posteriormente, foram desenvolvidas rotinas computacionais para processar os dados de chuva e de vazão previamente importados para o ambiente do SYHDA, a fim de organizar séries hidrológicas de chuva total ou chuva máxima diária, e de vazão média, vazão mínima ou vazão máxima, respectivamente. O SYHDA foi estruturado para permitir que o usuário extraia, dos dados principais por ele inseridos, séries históricas nos intervalos de tempo diário, semanal, quinzenal, mensal ou anual, seguindo o calendário considerando ano civil ou hidrológico.

Também foi idealizada uma rotina para permitir trabalhar com períodos de falhas nas séries, por meio de um limiar estabelecido pelo usuário, empregando

os dados de períodos que estão em conformidade com o imposto e excluindo aqueles que fazem parte de períodos que estão em desacordo. Uma vez estabelecida a série, o SYHDA foi programado para permitir exportá-la em arquivo *.xls, sendo este o padrão para importação da base de dados hidrológicos no ambiente do LASH.

Objetivando analisar as séries históricas organizadas no ambiente do SYHDA e os resultados de saída da simulação hidrológica com o LASH, foi programado um módulo de análises estatísticas básicas. Este módulo, cujo fluxograma empregado em seu desenvolvimento pode ser visualizado na Figura 15, contemplou gráficos básicos, como histograma de frequência e curva de permanência, e medidas estatísticas básicas, como média aritmética, harmônica e geométrica, mediana, desvio médio, variância, desvio padrão, valores mínimo e máximo, e coeficientes de variação, assimetria e curtose.

Considerando as proporções tomadas pelo SYHDA durante seu desenvolvimento, buscando suprir a demanda por ferramentas específicas de análise de dados hidrológicos, outros módulos (Figura 15) foram desenvolvidos, abrangendo modelagem probabilística com várias distribuições de probabilidades e testes de aderência, testes não-paramétricos, teste de heterogeneidade regional e análises de sazonalidade. Como estes módulos não integram o escopo deste trabalho, não foram descritos.

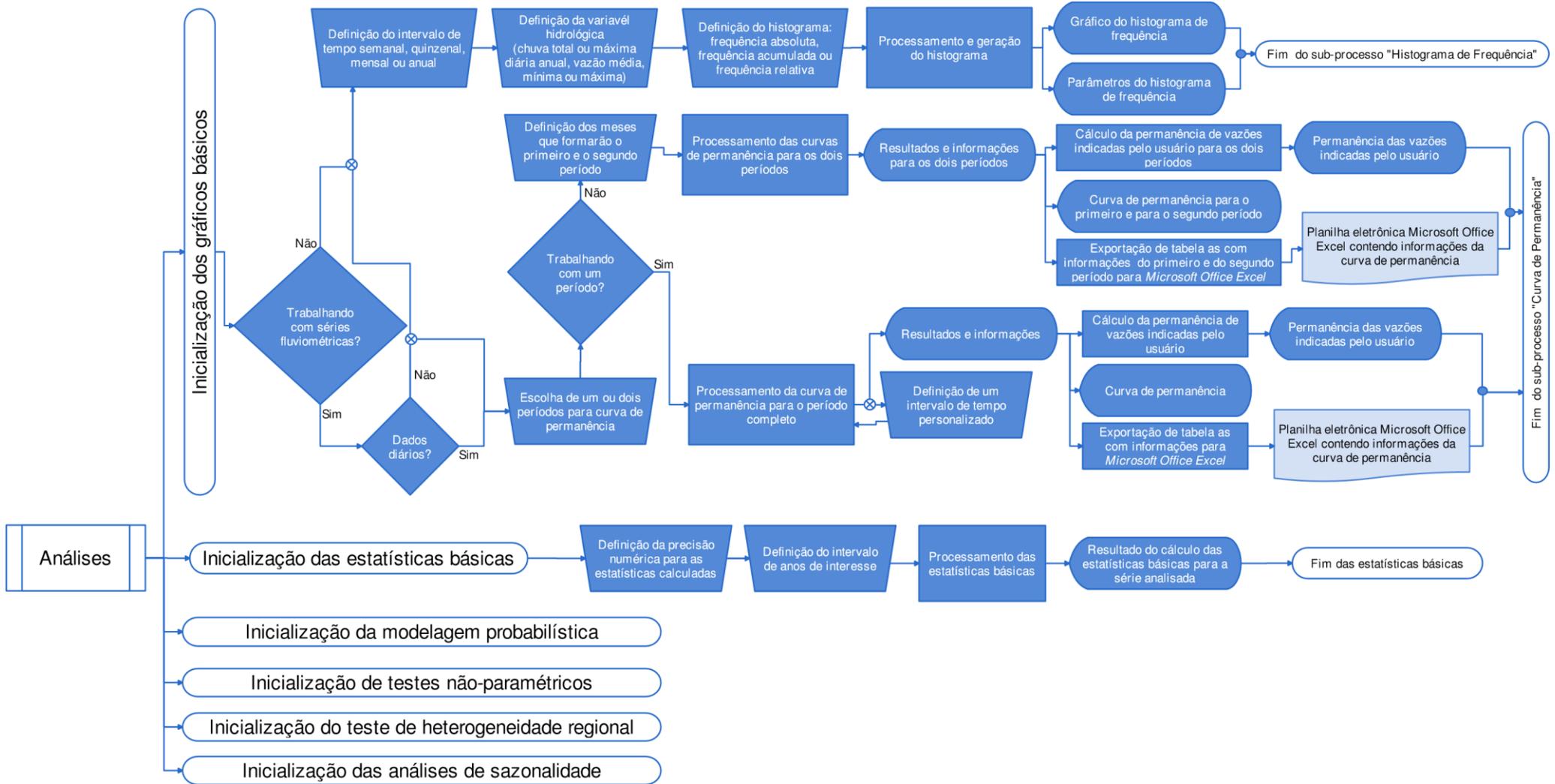


Figura 15 - Fluxograma dos módulos de gráficos e estatísticas básicas do *System of Hydrological Data Acquisition and Analysis* (SYHDA)

Em síntese, o propósito geral do SYHDA pode ser melhor compreendido na Figura 16, sendo considerado um módulo de processamento intermediário entre o usuário e o modelo hidrológico LASH, em que as duas interfaces se conectam através do módulo de integração, que será descrito na seção seguinte.

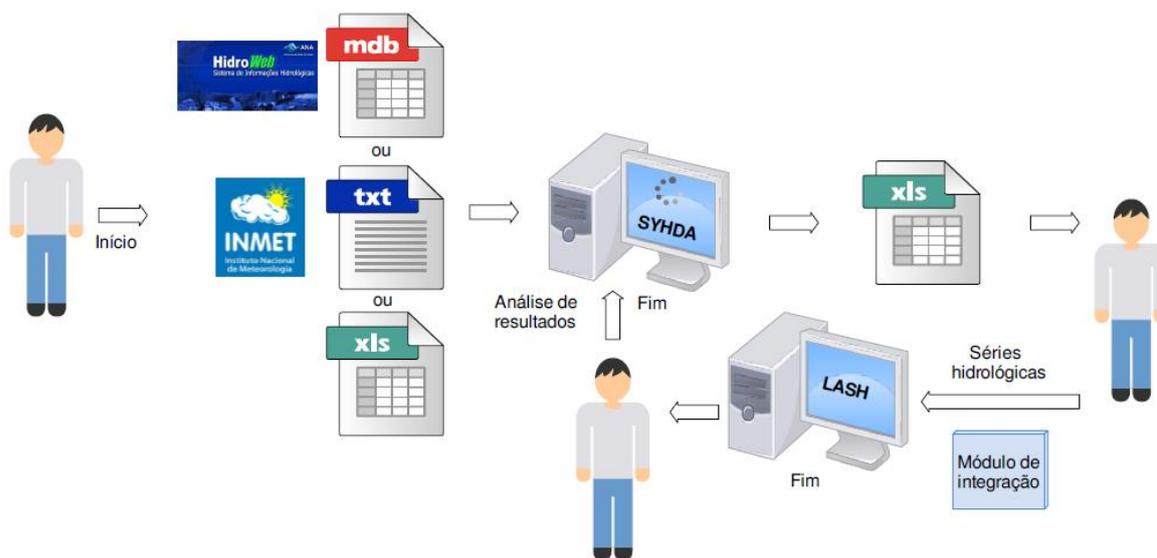


Figura 16 - Ideia central do desenvolvimento do *System of Hydrological Data Acquisition and Analysis* (SYHDA)

Todas as funcionalidades implementadas no SYHDA foram avaliadas quanto à acurácia, haja vista que os dados hidrológicos empregados nos estudos de caso dessa versão do LASH foram processados no ambiente do aplicativo.

2.3. ArcLASH

A terceira versão do LASH tem o intuito de suprir a demanda por parte de diversos profissionais da área de recursos hídricos, de modo que sua aplicação seja mais realística, proporcionando um ambiente intuitivo e ferramentas de apoio para um processamento rápido e automatizado de bases de dados. Neste contexto, foi identificada uma carência na primeira versão do modelo, que remetia à inexistência de uma ferramenta que permitisse ao usuário elaborar, de forma automática, a base de dados espaciais inerentes à simulação hidrológica, haja vista que esta é uma etapa bastante susceptível a erros de processamento e

totalmente dependente da experiência do profissional, especialmente no tocante a geoprocessamento.

Buscando suprir esta carência, idealizou-se um módulo suplementar denominado ArcLASH. Este módulo foi desenvolvido na forma de *script*, para ser executado através do ArcGIS® (ESRI, 2014), o qual é um Sistema de Informações Geográficas (SIG) bastante difundido no mundo, fornecendo várias funcionalidades para a realização de análise, mapeamento e gerenciamento de dados geográficos. A linguagem de programação adotada foi Python que, em sua essência é de propósito geral, todavia, vem se destacando na área de hidrologia pela crescente utilização no desenvolvimento de tecnologias, motivada principalmente por permitir a interação entre ferramentas de SIG, matemática e estatística (TOMER, 2011). Foram empregados especialmente os códigos de programação disponíveis na biblioteca ArcPy, a qual contempla todas ferramentas de geoprocessamento e demais funcionalidades do ArcGIS.

O ArcLASH foi idealizado seguindo o princípio da parcimônia (TUCCI, 2005), onde buscou-se identificar os mapas e informações que deveriam constituir a base de dados espacial do LASH e o menor número de entradas necessárias para que fosse possível estabelecê-la, levando em consideração as peculiaridades do modelo e a viabilidade das operações e da própria ferramenta.

Na sua terceira versão, o modelo hidrológico LASH demanda os mapas de Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDE-HC), declividade do terreno, direção e acúmulo de fluxo, rede de drenagem, sub-bacias hidrográficas, solos ou atributos do solo, uso do solo e de polígonos de Thiessen das estações de monitoramento meteorológico e pluviométrico, devendo estes ser arquivos de texto (*.txt), possuírem o mesmo sistema de coordenadas e estarem exatamente sobrepostos.

Desta forma, foi estabelecido que o usuário deveria possuir as seguintes informações básicas sobre sua área de interesse: o Modelo Digital de Elevação (MDE) do terreno, o mapa de solos ou de atributos do solo, o mapa de uso do solo, a localização da seção de controle, o mapa das estações de monitoramento pluviométrico e meteorológico e o limiar para definição da rede de drenagem. Objetivando eximir o usuário da necessidade de pré-processamentos, estabeleceu-se também que os mapas poderiam ser de tamanhos variáveis,

desde que contemplando a área da bacia hidrográfica, e que poderiam estar em sistemas de coordenadas distintos, sem nenhum prejuízo à análise.

Uma vez definidos os mapas e as informações de entrada, foi implementada uma sequência lógica de operações de geoprocessamento e de hidrologia, cujo fluxograma pode ser visualizado na Figura 17. Estas operações incluíram:

- i) a padronização dos mapas para o sistema de coordenadas, definido pelo usuário dentre aqueles contemplados pelos mapas de entrada;
- ii) o preenchimento das depressões espúrias do terreno, gerando o MDE hidrologicamente consistente (MDE-HC);
- iii) a determinação dos mapas de direção de fluxo e de acúmulo de fluxo;
- iv) a determinação do mapa de declividade do terreno;
- v) a delimitação da bacia hidrográfica com base na seção de controle indicada pelo usuário e a extração dos mapas, anteriormente mencionados, para a área delimitada pelo divisor de águas;
- vi) a definição da rede de drenagem numérica, considerando um limiar mínimo de área de drenagem, estabelecido pelo usuário;
- vii) a identificação das confluências da rede de drenagem numérica e a delimitação das sub-bacias hidrográficas;
- viii) a determinação da máxima distância percorrida pelo escoamento superficial direto em cada sub-bacia hidrográfica, em relação ao seu exutório;
- ix) a extração dos mapas vinculados ao solo e ao uso do solo para a área da bacia hidrográfica;
- x) a identificação das estações meteorológicas e pluviométricas a serem empregadas na análise, considerando uma limiar máximo de distância em relação ao divisor de águas da bacia;
- xi) o traçado dos polígonos de Thiessen das estações meteorológicas e pluviométricas, considerando o divisor de águas da bacia hidrográfica; e

- xii) a conversão de mapas no formato *raster* para *.ascii, visando importação da base de dados espaciais para o ambiente do modelo LASH.

O banco de dados e as rotinas de simulação hidrológica da terceira versão do modelo LASH demandam também informações específicas referentes às sub-bacias hidrográficas, às estações de monitoramento meteorológico e pluviométrico e à seção de controle, as quais podem ser classificadas como “passíveis de processamento” ou “dependentes do usuário”, sendo as últimas referentes à identificação e caracterização da rede de monitoramento. Neste contexto, o ArcLASH foi estruturado para processar tais informações e compilá-las em tabelas de atributos (*.txt); determinou-se que as informações “dependentes do usuário” seriam por ele inseridas nas tabelas de atributos dos respectivos mapas, em campos padronizados que permitissem a identificação, enquanto que aquelas “passíveis de processamento” seriam obtidas pela implementação de rotinas no script da ferramenta.

A etapa final do processamento da base de dados espaciais para o modelo LASH, no ambiente do ArcLASH, consistiu na definição de um local para armazenamento dos mapas e das tabelas de atributos. Foi implementada no script do ArcLASH a criação automática de uma pasta com nomenclatura padrão, devendo o diretório para alocação desta ser indicado pelo usuário.

Em síntese, o propósito geral do ArcLASH pode ser melhor compreendido na Figura 18, sendo considerado um módulo de processamento intermediário entre o usuário e o modelo hidrológico LASH, em que as duas interfaces se conectam através do módulo de integração, que será descrito na seção seguinte.

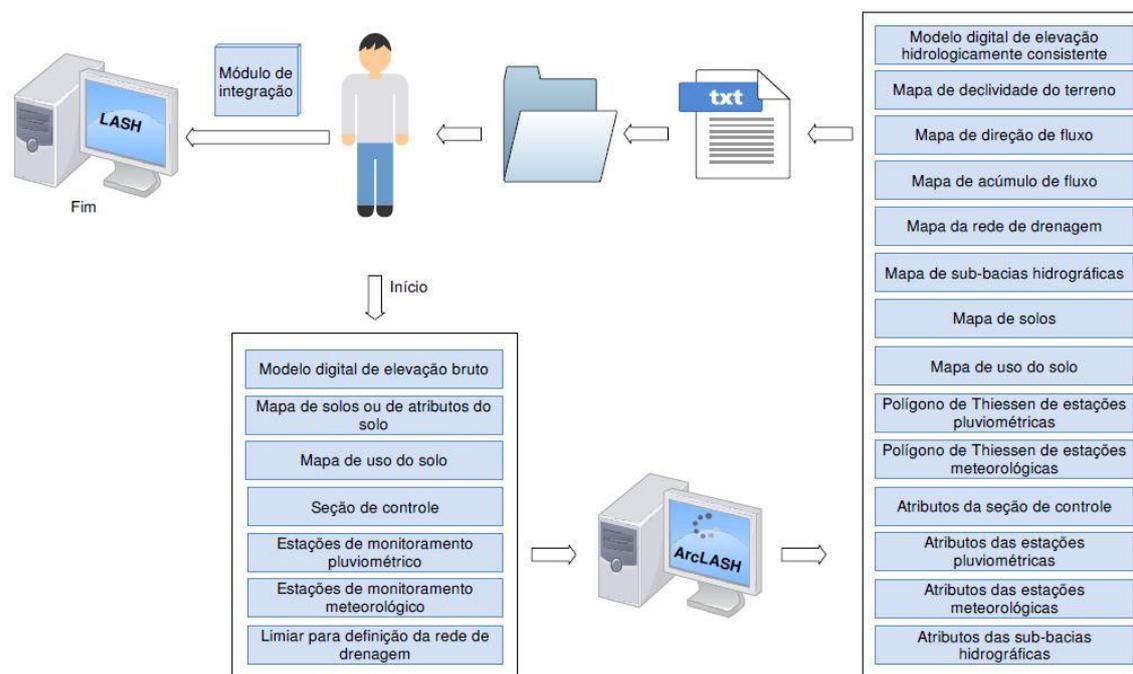


Figura 18 - Idealização central do módulo de processamento automático da base de dados espaciais “ArcLASH”

Todas as operações de geoprocessamento e hidrologia implementadas no ArcLASH (Figura 18) foram avaliadas quanto ao desempenho e acurácia. As bases de dados da BHAP e da BHAF foram processadas no ArcLASH através das seguintes entradas: mapa do MDE (Figura 71), com resolução espacial de 30 m; mapa de classificação dos solos do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1973) (Figura 72); mapa de uso do solo (Figura 73), abrangendo uma área superior a das bacias hidrográficas analisadas; mapa de estações pluviométricas (Figura 74); mapa de estações meteorológicas (Figura 75); e mapas das seções de controle da BHAP (Figura 76) e da BHAF (Figura 77).

2.4. Módulo de banco de dados

Idealizado com o objetivo de armazenar informações referentes às estações de monitoramento, às classes de solo e às classes de uso do solo, o módulo de banco de dados do modelo hidrológico LASH foi estruturado empregando o ambiente de programação Delphi®, que é uma *Integrated Development Environment* (IDE) de desenvolvimento para a plataforma

Windows[®], o sistema de banco de dados Firebird[®], o gerenciador de banco de dados IBExpert[®]; e o componente de conexão do banco de dados ZeosLib[®].

Primeiramente, foram estruturadas tabelas específicas visando o armazenamento de informações referentes às estações de monitoramento pluviométrico, fluviométrico e meteorológico, incluindo aspectos básicos como nome e localização espacial. Com o intuito de eximir o usuário da necessidade de conhecimento acerca de programação computacional, foram criadas interfaces gráficas para permitir o preenchimento de tais informações e o posterior armazenamento no banco de dados, tarefa esta que também foi estruturada para ocorrer de forma automática, quando da importação do banco de dados espacial processado pelo ArcLASH (seção 3.6, seção 4.2), mais especificamente, das tabelas de atributos das estações de monitoramento.

A importação das séries históricas de dados pluviométricos, fluviométricos e meteorológicos foi estruturada à parte do cadastramento das estações, em interface gráfica específica para cada tipo de informação. Foram criadas tabelas para armazenamento no banco de dados, e rotinas computacionais foram desenvolvidas para vincular cada série à respectiva estação de monitoramento.

Com relação às classes de uso do solo, foram estruturadas tabelas e uma interface gráfica, objetivando permitir o cadastramento, armazenamento, visualização e edição de variáveis como Índice de Área Foliar (IAF), profundidade do sistema radicular, albedo, dentre outras, com discretização temporal mensal.

O banco de dados associado às classes de solo, por sua vez, foi estruturado para permitir o cadastramento e armazenamento das classes de solo e de suas variáveis (profundidade do solo, conteúdo de água no solo na saturação, conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente, etc.). Para tal intento, foi necessário estruturar uma tabela no banco de dados e uma interface gráfica para cadastramento manual, visualização e edição dos valores.

2.5. Módulo de integração

A conexão entre a base de dados espaciais, processada através da ferramenta ArcLASH, e as informações armazenadas no banco de dados, referentes às estações de monitoramento e variáveis atreladas às classes de solo

específicas, idealizadas para permitir a visualização dos mapas no ambiente do modelo LASH, incluindo legendas coloridas e opções de arraste e zoom.

Junto à legenda dos mapas de classes de solo e de uso do solo, nas mesmas interfaces acima mencionadas, foram implementadas listas suspensas, programadas para exibir, respectivamente, as classes de solo e de uso do solo cadastradas pelo usuário no banco de dados. Esta funcionalidade foi idealizada para permitir uma integração visual entre mapa e banco de dados, onde o usuário relacionasse cada atributo à um conjunto de variáveis cadastradas.

Por sua vez, a importação automática das tabelas de atributos das estações de monitoramento pluviométrico, meteorológico e fluviométrico, bem como da tabela de atributos das sub-bacias hidrográficas, se deu pelo desenvolvimento de rotinas computacionais com base nos arquivos padrões exportados pelo ArcLASH, no formato *.txt, como ilustrado na Figura 20.

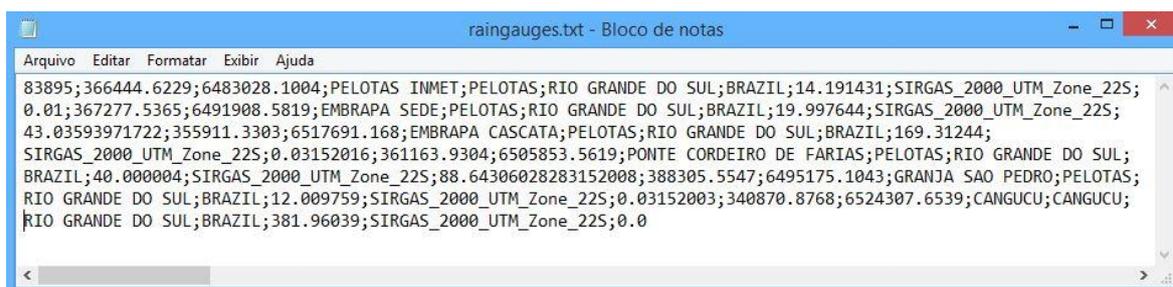


Figura 20 - Arquivo *.txt de estações pluviométricas, contendo informações que serão importadas pelo modelo LASH através do módulo de integração

Outra funcionalidade atribuída ao módulo de integração remeteu-se à caracterização das sub-bacias hidrográficas. Para tal intento, foram desenvolvidas interfaces gráficas e implementadas rotinas computacionais que, fundamentadas na base de dados espaciais, permitissem computar: i) características fisiográficas de cada sub-bacia analisada, além daquelas exportadas pelo ArcLASH através da tabela de atributos das sub-bacias; ii) as variáveis médias vinculadas ao uso do solo, para cada sub-bacia hidrográfica e mês do ano; iii) as variáveis médias atreladas às classes de solo, para cada sub-bacia hidrográfica; iv) a área de influência de cada estação de monitoramento pluviométrico sobre cada uma das sub-bacias, considerando os polígonos de Thiessen das estações pluviométricas; e v) a área de influência de cada estação de monitoramento meteorológico sobre

cada uma das sub-bacias, considerando os polígonos de Thiessen das estações meteorológicas.

2.6. Módulo de calibração automática

Na segunda versão do modelo LASH, a calibração dos parâmetros desconhecidos é realizada através do algoritmo *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) (Duan et al., 1992), o qual consiste em um algoritmo de calibração automática mono-objetivo, fundamentado em 4 conceitos de grande potencial para tal finalidade, a saber: i) o da combinação de abordagem probabilística e determinística; ii) o da clusterização; iii) o da evolução sistemática de um conjunto de pontos, dentro do espaço possível, em direção à melhor otimização ; e iv) e o da evolução competitiva (DUAN; GUPTA; SOROOSHIAN, 1993).

Segundo Beskow (2009), procedimentos determinísticos são aplicados para o método ganhar informação na superfície de resposta, a fim de direcionar a busca, enquanto que componentes aleatórios garantem que o algoritmo seja flexível e robusto. O primeiro passo do SCE-UA é criar aleatoriamente um complexo de pontos em todo espaço possível, devendo este ser grande o suficiente para garantir que toda informação necessária seja fornecida, no que diz respeito ao número, localização e tamanho da maior região de atração. A técnica de clusterização é empregada para tornar possível guiar a busca na mais promissora das regiões identificadas no complexo inicial. Uma estratégia de complexo evolutivo sistemático é essencial para fornecer robustez à busca e, de forma adicional, para o direcionamento de busca baseado na função objetivo escolhida. A incorporação de um procedimento de evolução competitiva é útil para melhorar a eficiência da convergência global.

Na Figura 21 é apresentado o fluxograma do algoritmo de calibração automática SCE-UA.

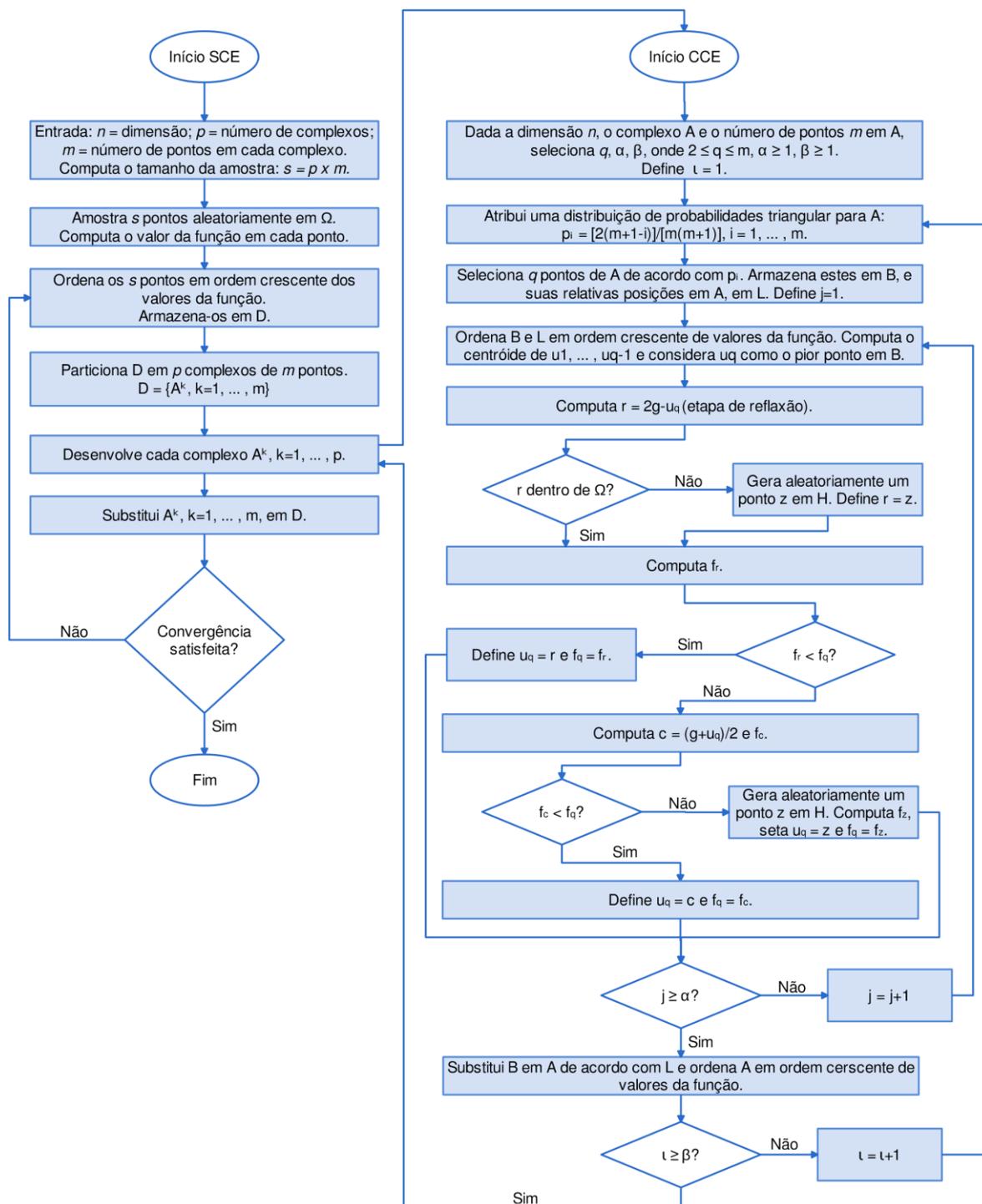


Figura 21 - Fluxograma do algoritmo SCE-UA acoplado ao modelo LASH para calibração automática de parâmetros desconhecidos

O algoritmo SCE-UA tem sido amplamente aplicado na calibração de parâmetros de modelos hidrológicos, como se verifica em Duan, Sorooshian e Gupta (1994), Vrugt *et al.* (2006), Bao *et al.* (2010); Dakhloui, Bargaoui e Bárdossy (2012), inclusive em casos bastante complexos, como no estudo de

Eckhardt e Arnold (2001), os quais o empregaram para calibrar 18 parâmetros do modelo SWAT-G (ECKHARDT *et al.*, 2002). Segundo Collischonn e Tucci (2003), vários autores já compararam o desempenho do SCE-UA frente à outros métodos de calibração automática, sempre constantando vantagens significativas.

Junto à segunda versão do modelo LASH, o SCE-UA tem proporcionado excelentes resultados frente à calibração de parâmetros de diversas bacias hidrográficas brasileiras, como verifica-se em Beskow (2009), Beskow, Mello e Norton (2011), Beskow *et al.* (2011), Beskow, Mello e Norton (2013) e Beskow *et al.* (2016). Todavia, nestes casos de aplicação, os parâmetros foram calibrados para a bacia hidrográfica de modo concentrado.

Quando da necessidade de realizar a calibração de um modelo discretizado por sub-bacias hidrográficas, pode ser mais conveniente considerar a variabilidade espacial dos parâmetros. Neste contexto, foi desenvolvido um novo módulo de calibração automática, também baseado no algoritmo SCE-UA, em que o usuário pode indicar quais parâmetros deseja calibrar por sub-bacia e quais deseja calibrar para toda a bacia hidrográfica, tornando a simulação hidrológica mais realística. De forma complementar, buscou-se disponibilizar, na terceira versão do modelo LASH, a otimização dos parâmetros com base em três diferentes funções objetivos, a saber: raiz quadrada do erro quadrático médio, coeficiente de Nash-Sutcliffe e a sua versão logarítmica; na segunda versão do modelo, apenas a primeira opção de função objetivo pode ser utilizada.

3 Resultados e Discussão

3.1. SYHDA

A Figura 22 permite visualizar a interface gráfica inicial do SYHDA e os menus que alocam as funcionalidades do aplicativo, a saber:

- i) *Options*, que é apresentado na Figura 22 de forma expandida em submenus, e é responsável por executar a aquisição de dados de vazão (*Streamflow*) e de chuva (*Rainfall*), por meio de um arquivo padrão do HidroWeb/ANA (*.MDB), definido pelo usuário (*.xls) ou padrão do INMet (*.txt), no caso de *Rainfall*;
- ii) *Analysis*, que fornece suporte à realização de análises estatísticas básicas, contemplando curva de permanência e histograma de frequência, à modelagem probabilística de séries históricas por inúmeras distribuições de probabilidades, empregando quatro diferentes testes de aderência, à realização de testes não paramétricos de estacionariedade, independência e homogeneidade, à análise de heterogeneidade regional e à análise de sazonalidade;
- iii) *Settings*, que permite ao usuário configurar suas análises com base no calendário do ano civil ou do ano hidrológico, sendo o primeiro o *default* do programa (Figura 22);
- iv) *Help*, que fornece ao usuário um arquivo de ajuda e suporte; e
- v) *About*, que traz informações acerca do aplicativo.

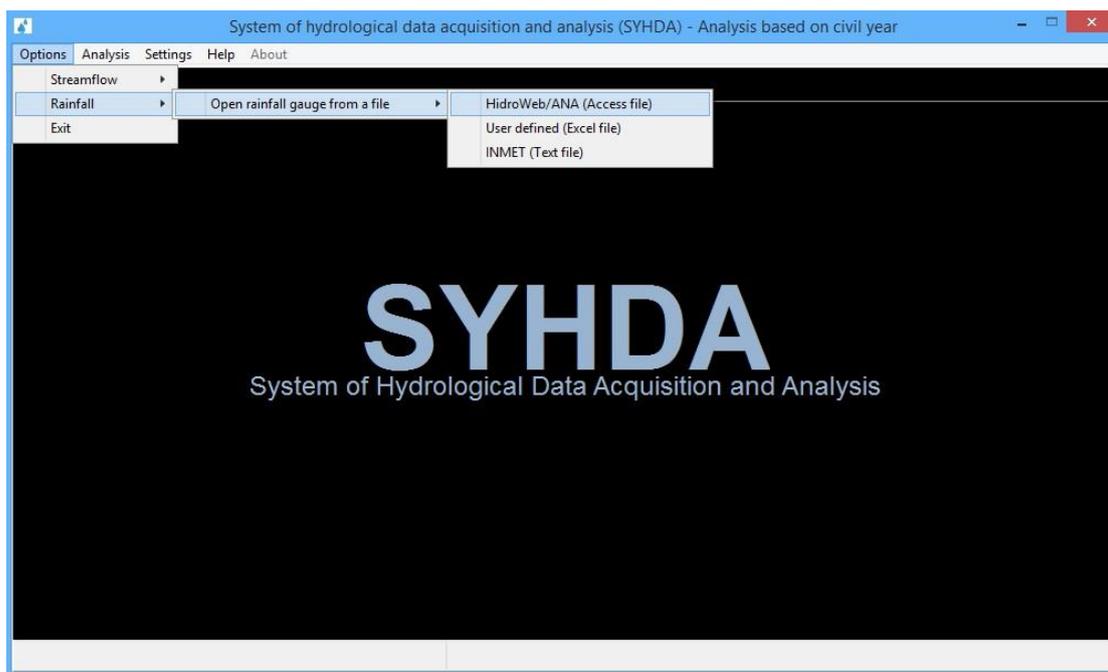


Figura 22 - Interface do módulo de processamento da base de dados temporal “SYHDA”

O primeiro contato entre o usuário e a série histórica importada para o ambiente do SYHDA por ser visualizado na Figura 23, onde, a título de ilustração, são exibidos os dados de vazão média diária monitorados pela estação 88750000, seção de controle da bacia hidrográfica do Arroio Fragata na localidade Passo dos Carros (Bhaf-PC)

 The image shows the SYHDA software window with the "Series Settings" tab selected. The "File Format" is set to "Access File" and the "Cod station" is "s Carros". The "Time step" is set to "Daily". A table displays monthly data from October 1964 to November 1965. The table has columns for Month, Situation, % Failures, Days/Failures, Day 1, Day 2, and Day 3. The "Records" count is 577.

Month	Situation	% Failures	Days/Failures	Day 1	Day 2	Day 3
October/1964	Missing Data	55,00	31 / 17			
November/1964	Missing Data	47,00	30 / 14			
December/1964	--	0,00	--	0,60	0,67	0,85
January/1965	--	0,00	--	0,32	0,32	0,32
February/1965	--	0,00	--	0,32	0,25	0,32
March/1965	--	0,00	--	0,22	0,25	0,18
April/1965	--	0,00	--	1,70	1,40	1,13
May/1965	--	0,00	--	0,88	0,88	0,81
June/1965	--	0,00	--	0,53	0,60	3,05
July/1965	--	0,00	--	0,74	0,77	0,85
August/1965	--	0,00	--	0,50	1,13	6,10
September/1965	--	0,00	--	9,30	13,40	15,10
October/1965	--	0,00	--	3,05	2,45	2,12
November/1965	--	0,00	--	3,90	3,05	2,32

Figura 23 - Interface inicial de visualização da série histórica no ambiente do SYHDA

A tabela exibida na guia *Streamflow* (Figura 23) é semelhante àquela padrão do HidroWeb para arquivos *.MDB, porém apenas com informações dos campos pertinentes a esta análise, permitindo que, além do mês/ano de observação e os respectivos dados, a situação do período com relação às falhas de registro seja conhecida. Na mesma guia (Figura 23), ainda pode-se visualizar a interface contendo as opções disponíveis de intervalo de tempo (*Time Step*), onde o usuário define o intervalo em que deseja obter a série final a partir da série histórica de dados diários, considerando um limiar de falhas (*Threshold*), em número de dias, também informado por ele na mesma interface.

Na guia *Series* (Figura 24) o SYHDA permite ao usuário, além de visualizar a série processada de acordo com as configurações iniciais (guia *Streamflow*), exportá-la para um arquivo em formato *.xls, padrão para ser importado para o ambiente do LASH. Já na guia *Series Settings* (Figura 24), é possível obter e exportar séries históricas de vazões mínimas, médias e máximas, para qualquer intervalo de tempo indicado anteriormente pelo usuário, exceto o diário. Outro processamento bastante interessante, implementado nesta guia do SYHDA, é de séries de vazões mínimas médias, com base na média móvel de n dias, sendo bastante usual quando da necessidade de avaliação de vazões de referência para outorga de uso d'água, como a $Q_{7,10}$ (vazão mínima média de 7 dias com tempo de retorno de 10 anos).

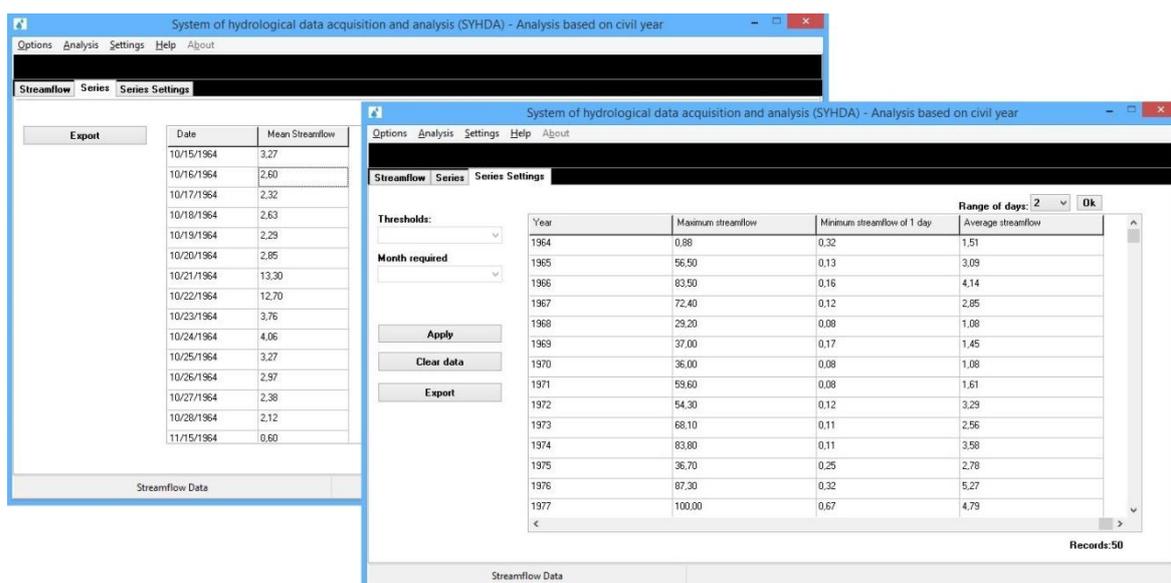


Figura 24 - Interface de visualização das séries organizadas pelo SYHDA

Como o exemplo de aplicação do SYHDA conduzido neste estudo contempla uma série fluviométrica, algumas peculiaridades do aplicativo para esse tipo de dado foram evidenciadas. Ao importar dados de chuva, o usuário irá se deparar com as mesmas interfaces, contudo, o menu *Streamflow* será substituído por *Rainfall*, onde serão exibidos os dados de chuva total diária, e o menu *Series Settings* permitirá processar e exportar séries históricas de precipitação total e de precipitação máxima diária, para o intervalo de tempo definido pelo usuário, com exceção do diário.

Frente ao exposto, é notória a grande aplicabilidade do SYHDA, haja vista que proporciona ao usuário a elaboração de séries históricas de chuva e de vazão para diferentes intervalos de tempo, conferindo-lhe agilidade e confiabilidade na compilação de bases de dados hidrológicos. Ademais, a possibilidade de introduzir um limiar de falhas à análise e validação dos dados pode ser considerada como um dos diferenciais do SYHDA, permitindo ao usuário realizar, num curto espaço de tempo, inúmeras simulações de limiar com a série de interesse.

Outra funcionalidade do SYHDA é o módulo de análises estatísticas básicas, o qual pode ser visualizado na Figura 25, com resultados obtidos pelo processamento da série de dados de vazões médias diárias observadas na estação 88750000, para o período de dados empregados na avaliação do LASH na BHAF-PC. Nesta interface (Figura 25) o usuário pode visualizar a média aritmética, harmônica e geométrica, mediana, desvio médio, variância, desvio padrão, valores mínimo e máximo, e coeficientes de variação, assimetria e curtose da série de dados de interesse, para o intervalo de tempo e limiar de falhas escolhido, indicando a precisão (*Precision*) dos valores que serão exibidos, podendo também calculá-los para um período específico (*Data Filter/Year Range*).

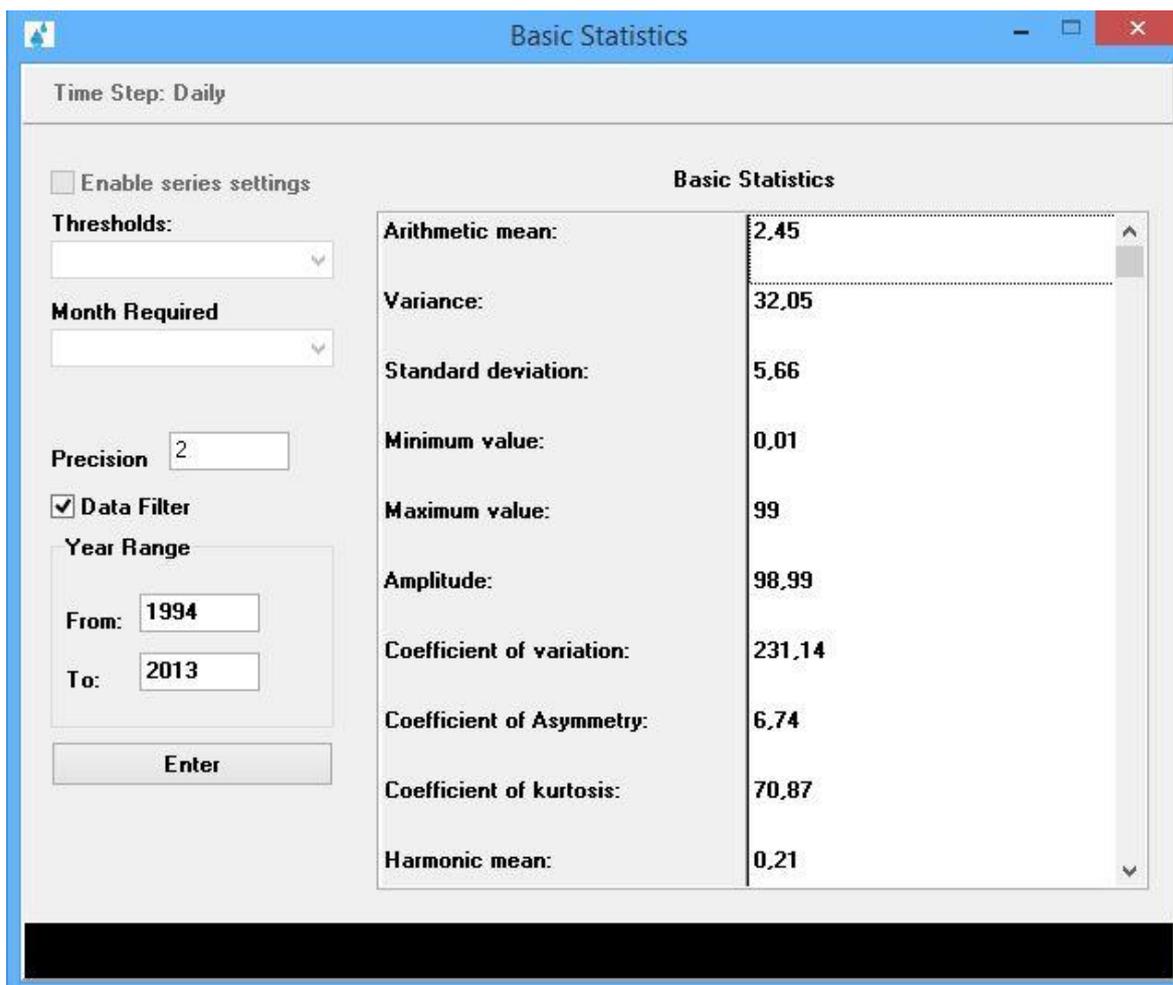


Figura 25 - Interface do SYHDA para cálculo de estatísticas básicas

Além das estatísticas básicas, o SYHDA permite realizar análises gráficas, empregando duas ferramentas clássicas em hidrologia: o histograma de frequência e a curva de permanência. Na Figura 26 pode-se visualizar a interface gráfica para processamento do histograma de frequência e o gráfico de frequência relativa acumulada (*Cumulate relative frequency*), com os respectivos parâmetros, processado a partir de dados de vazão média anual, derivados de dados diários observados na estação 88750000 (BHAF-PC). Nesta interface pode-se observar que também é possível representar o histograma pela frequência relativa (*Relative frequency*) ou pela frequência absoluta (*Absolute frequency*). Uma grande vantagem do SYHDA quando do processamento do histograma de frequência reside no fato de que é possível gerá-lo para outras variáveis que não a indicada, como vazão mínima ou vazão máxima, sem ter que retornar ao início do processo de elaboração da série.

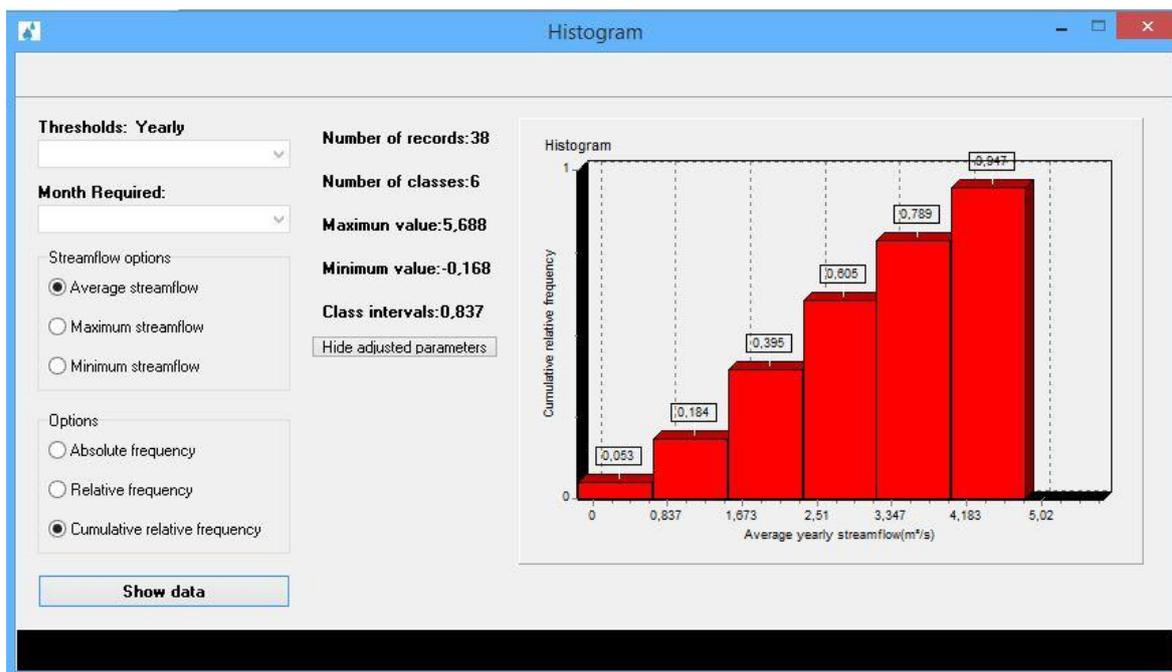


Figura 26 - interface do SYHDA para geração do histograma de frequência

A curva de permanência pode ser elaborada no SYHDA considerando todos os meses do ano ou segmentando-o em dois períodos. A interface para elaboração da curva de permanência para todo o período (Figura 27) dispõe de 3 guias: em *Analysis* (Figura 27a) o usuário processa a referida curva com base na série de dados por ele configurada, podendo indicar um período de anos específico (*Data Filter/Year Rate*) para a análise e exportar os resultados obtidos para um arquivo *.xls, em *Graphic* (Figura 27b) pode visualizar o gráfico processado e seus valores, podendo habilitar escala logarítmica (*Logarithm Scale*), e em *Table* (Figura 27c) pode calcular vazões associadas a frequência com que são excedidas ou igualadas, indicando essa frequência ou o intervalo em que deseja obtê-las. A interface para processamento da curva de permanência em dois períodos é semelhante àquela exibida na Figura 27, no entanto, anteriormente ao processamento, o usuário deve indicar os meses do ano que contemplam o primeiro período, de modo a definir a divisão dos dados para processamento.

Flow-duration curve - All the period

Analysis Graphic Table

Export

Data Filter

Year Range

From 1994

To: 2013

Enter

Order	Streamflow(m ³ /s)	Frequency(%)
1	99	0,0153
2	97,8	0,0307
3	84,2	0,0460
4	81,4	0,0614
5	68,85	0,0767
6	68,2	0,0920
7	67,8	0,1074
8	66,57	0,1227
9	57,95	0,1381
10	56,9	0,1534
11	56,2	0,1687
12	55,2	0,1841
13	50,9	0,1994
14	50,9	0,2148

a)

Flow-duration curve - All the period

Analysis Graphic Table

Logarithm Scale

Frequency(%)	Streamflow(m ³ /s)
0,0153	99
5,0008	10,8
10,0015	5,6
15,0023	3,69
20,0031	2,68
25,0038	2,03
30,0046	1,6
35,0054	1,35
40,0061	1,13
45,0069	0,96
50,0077	0,81
54,9931	0,69
59,9939	0,56
64,9946	0,46

b)

Flow-duration curve - All the period

Analysis Graphic Table

Streamflow Options

Calculate streamflow every Select from

Select to Select

OK

Calculate streamflow for the following duration(%):

Insert

OK

Clear

Durations(%)
50
60
70
80
90

Frequency(%)	Streamflow(m ³ /s)
10	5,65
20	2,68
30	1,60
40	1,13
50	0,81
60	0,56
70	0,37
80	0,22
90	0,07

c)

Figura 27 - Interface do SYHDA para curva de permanência, exibindo o menu *Analysis*(a), *Graphic* (b) e *Table* (c)

Nos estudos desenvolvidos por Beskow, Mello e Norton (2011), Beskow *et al.* (2011), Viola *et al.* (2012), Beskow, Norton e Mello (2013), Viola *et al.*, (2014a), Viola *et al.* (2014b) e Aquino (2014), o modelo LASH não contava com um módulo de aquisição e análise de dados hidrológicos. Portanto, tais autores tiveram que lançar mão de softwares de propósito geral ou planilhas eletrônicas, como a *Microsoft Office Excel*, com vistas à elaboração das séries hidrológicas e à análise dos resultados oriundos da calibração, validação e simulação de cenários através do LASH.

A aplicabilidade do SYHDA constatada neste estudo, em se tratando dos módulos de aquisição de dados e de análises estatísticas, básicas e gráficas, corrobora com os estudos de Beskow *et al.* (2013) e de Corrêa *et al.* (2013), os quais avaliaram seu desempenho com base em dados médios diários de vazão observados na estação 88850000, seção de controle da BHAP-PCF.

Os demais módulos, implementados no SYHDA objetivando suprir a demanda por ferramentas específicas de análises hidrológicas, têm sido constante e crescentemente empregados em diversos estudos, como em Beskow *et al.* (2014), Corrêa (2014), Corrêa *et al.* (2014), Beskow *et al.* (2015), Caldeira *et al.* (2015) e Vargas *et al.* (2015).

Beskow *et al.* (2014) verificaram o potencial de três índices de sazonalidade aplicados à avaliação espaço-temporal de vazões de estiagem no estado do Rio Grande do Sul, com base em dados fluviométricos de 108 bacias hidrográficas. Os autores empregaram o SYHDA para elaborar séries de vazões médias diárias, gerar curvas de permanência de vazões médias diárias, considerando um e dois períodos anuais, obter as vazões de referência e calcular os índices de sazonalidade.

Corrêa (2014) desenvolveu um *software*, denominado *Clustering Tool*, onde implementou técnicas de Inteligência Artificial (IA) com vistas à clusterização de dados hidrológicos. O autor avaliou o desempenho das técnicas de IA implementadas empregando os resultados obtidos por Beskow *et al.*, (2014), utilizando o SYHDA para submeter as 108 séries de dados fluviométricos ao teste de estacionariedade de Man-Kendall.

Vargas *et al.* (2015) avaliaram técnicas de IA, implementadas por Corrêa (2014), para determinação de regiões homogêneas visando à regionalização da

Q_{90} (vazão que é igualada ou excedida em 90% do tempo) no estado do Rio Grande do Sul, utilizando ainda os resultados obtidos por Beskow *et al.* (2014), para um dos três índices de sazonalidade de vazões de estiagem, e por Corrêa (2014), na análise de estacionariedade das séries. O SYHDA foi utilizado por Vargas *et al.* (2015) para avaliar a homogeneidade dos grupos estabelecidos, empregando o teste de heterogeneidade regional de Hosking e Wallis (1993).

Corrêa *et al.* (2014) buscaram avaliar o desempenho e acurácia do módulo de modelagem probabilística de séries hidrológicas, posteriormente empregado por Caldeira *et al.* (2015) e Beskow *et al.* (2015). Ambos os estudos objetivaram a modelagem probabilística de chuvas intensas no estado do Rio Grande do Sul, contudo, Caldeira *et al.* (2015) avaliaram distribuições de probabilidades tradicionais em hidrologia, empregando testes de aderência clássicos, enquanto Beskow *et al.* (2015) avaliaram distribuições de probabilidades multiparâmetros com base em testes de aderência robustos.

O pedido de registro de software junto ao Instituto de Propriedade Industrial (INPI) foi depositado em 11/11/2015, tendo autoria de Samuel Beskow, Tamara Leitzke Caldeira e Leonardo de Lima Corrêa, e titularidade da Universidade Federal de Pelotas. Em 02/02/2016 foi deferido o pedido e, hoje, o SYHDA encontra-se registado sob o número BR 51 2015 001307 6 (Figura 28).

INPI - QtWeb

https://gru.inpi.gov.br/pePI/servlet/ProgramaServletController?Action=detail&CodPed

BRASIL Acesso à informação

Instituto Nacional da Propriedade Industrial
Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior

Consulta à Base de Dados do INPI [Início | Ajuda?]

» Consultar por: Pesquisa Base Programas | Finalizar Sessão 1/1

Programa de Computador

Nº do Pedido: BR 51 2015 001307 6
 Data do Depósito: 11/11/2015
 Linguagem: DELPHI
 Campo de Aplicação: CC-09 / HB-02 / HD-01 / HD-03 / MA-04
 Tipo Programa: AP-01 , FA-01 , SM-01 , TC-01
 Título: SYHDA
 Nome do Titular: UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
 Nome do Autor: LEONARDO DE LIMA CORRÉA / SAMUEL BESKOW / TAMARA LEITZKE CALDEIRA
 Nome do Procurador: GLENIO DO COUTO PINTO JUNIOR

Petições

Pgo	Protocolo	Data	Img	Serviço	Cliente	Delivery	Data
✓	016150001433	11/11/2015	-	722	UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS		-

Publicações

RPI	Data RPI	Despacho	Img	Complemento do Despacho
2352	02/02/2016	090	-	
2349	12/01/2016	080	-	

Dados atualizados até 10/02/2016 - Nº da Revista: 2353

Figura 28 - Sítio eletrônico do INPI, exibindo informações a respeito do registro do software SYHDA

3.2. ArcLASH

A Figura 29 ilustra a ferramenta ArcLASH no ambiente do ArcGIS e sua localização na ArcToolBox, que é a interface utilizada pelo usuário do SIG para acessar, organizar e gerenciar uma coleção de ferramentas de geoprocessamento, modelos e *scripts*.

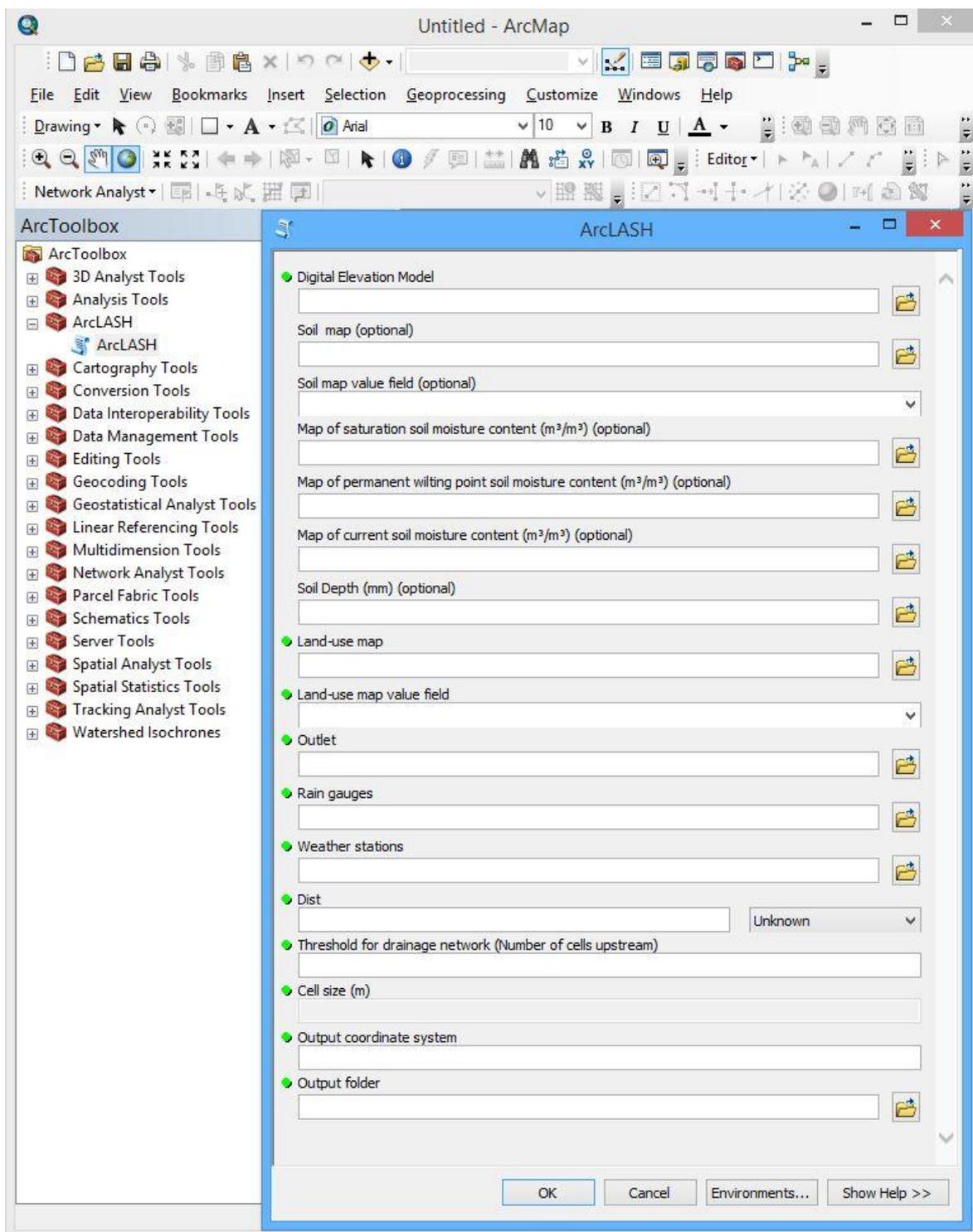


Figura 29 - Interface da ferramenta ArcLASH, destacando sua localização no ambiente do SIG ArcGIS

Pode-se observar na Figura 29 que trata-se de uma interface de boa usabilidade, termo este que segundo ABNT NBR ISO 9241-11 (1998) expressa, qualitativamente, a medida em que um produto pode ser usado por usuários específicos para alcançar objetivos específicos com efetividade, eficiência e

satisfação em um contexto de uso especificado. A interação usuário-computador apresenta uma sequência simples e lógica de entrada de mapas e informações, onde a experiência com o SIG não é fator limitante para sua utilização.

O MDE (Digital Elevation Model) é primeiro mapa requerido pelo ArcLASH (Figura 29) e deve obrigatoriamente estar em formato raster e contemplar a área da bacia hidrográfica de interesse, podendo ser igual ou maior que esta. A resolução espacial do DEM é arbitrada pelo usuário quando da sua definição, sendo o tamanho das células deste mapa (Cell size) empregado como padrão pelo ArcLASH no processamento de outros mapas derivados das características do terreno, a saber:

- i) MDE-HC;
- ii) Direção de fluxo;
- iii) acúmulo de fluxo;
- iv) declividade do terreno;
- v) rede de drenagem numérica
- vi) sub-bacias hidrográficas; e
- vii) máxima distância percorrida pelo escoamento superficial direto em cada sub-bacia hidrográfica, em relação ao seu exutório.

Com relação às informações do solo, o usuário pode lançar mão de duas possibilidades (Figura 29): a primeira refere-se ao emprego de um mapa contendo a classificação do solo (Soil map), em formato shapefile com feições em polígonos, seguido da seleção do campo da tabela de atributos do mapa (Soil map value field) que contém a referida classificação, enquanto que a segunda refere-se ao emprego dos mapas, em formato raster, de θ_S (Map of saturation soil moisture content), θ_{PMP} (Map of permanente wilting point soil moisture content), θ_A (Map of current soil moisture content), na unidade de volume de água por volume de solo, e de profundidade do solo (Soil Depth), na unidade de milímetros. Em ambos os casos, os mapas devem compreender a área da bacia hidrográfica de interesse na sua totalidade, podendo excedê-la.

O mapa de uso do solo (Land-use map) requerido pelo ArcLASH (Figura 29) é semelhante ao mapa de classificação do solo; o usuário deverá inserir um

shapefile com feições em polígonos, contemplando no mínimo a área da bacia de interesse, e posteriormente, selecionar o campo da tabela de atributos do mapa (Land-use map value field) que representa as classes de uso do solo.

A localização espacial da seção de controle do curso d'água (Outlet - Figura 29) deverá ser inserida como um shapefile com feição em ponto, contendo apenas 1 objeto, obrigatoriamente. A correta posição da seção de controle deve ser previamente verificada pelo usuário, haja vista que a sobreposição desta ao caminho de maior acúmulo de fluxo é crucial para a delimitação acurada da bacia hidrográfica.

Os mapas representando a rede de monitoramento pluviométrico (Rain gauges) e meteorológico (Weather stations) (Figura 29) devem, de modo semelhante ao da seção de controle, estar em formato shapefile com feições em pontos, porém, podendo conter inúmeros objetos. Neste aspecto, o ArcLASH permite ao usuário inserir um limiar de distância (Dist), no sentido externo ao divisor de águas da bacia, para o qual ele deseja considerar as estações contidas nos mapas. Esta funcionalidade é bastante importante, dando controle do processo ao usuário, pois existe a possibilidade dos mapas não possuírem estações localizadas na área delimitada ou então possuírem uma rede de monitoramento que contempla uma área maior que a da bacia, incluindo pontos distantes que possam não ser representativos para uma dada análise.

No campo denominado *Threshold for drainage network (number of cells upstream)* (Figura 29) o usuário deverá inserir o limiar inferior de acúmulo de fluxo, o qual definirá, sobre o *grid* do acúmulo de fluxo da bacia, a rede de drenagem numérica. O número mínimo de células inserido pelo usuário é inversamente proporcional ao número de sub-bacias hidrográficas que serão processadas pelo ArcLASH, haja vista que quanto menor, mais confluências de rede de drenagem se formarão na bacia.

O usuário deverá adotar um sistema de coordenadas (Output coordinate system - Figura 29) padrão para os mapas que serão exportados pelo ArcLASH, estando disponíveis os sistemas de coordenadas contemplados por seus mapas de entrada. A uniformização dos sistemas de coordenadas garantirá a sobreposição exata dos mapas exportados pelo ArcLASH.

Por fim, o diretório de armazenamento deve ser indicado no campo *Output folder*. Neste local, o ArcLASH criará automaticamente uma pasta denominada “OutputFolder” e, nesta pasta, as subpastas “maps” e “attribute_table”, onde armazenará os mapas e as tabelas de atributos, respectivamente, sendo a base de dados espaciais exportada sobre o formato de arquivo de texto (*.txt).

Na Figura 30 pode-se visualizar, no ambiente do SIG ArcGIS, a pasta padrão “OutputFolder” e as subpastas “attribute_table” e “maps”, criadas pelo ArcLASH quando do processamento da base de dados espaciais para a BHAP-PCF e BHAF-PC, bem como arquivos referentes aos mapas e tabelas de atributos para a BHAF-PC. A título de ilustração, pode-se observar ainda, no mesmo ambiente, o mapa de sub-bacias hidrográficas da BHAF-PC, gerado a partir do processamento do ArcLASH com os mapas de entrada (Figuras Figura 71, Figura 72, Figura 73, Figura 74, Figura 75 e Figura 77) e as configurações iniciais.

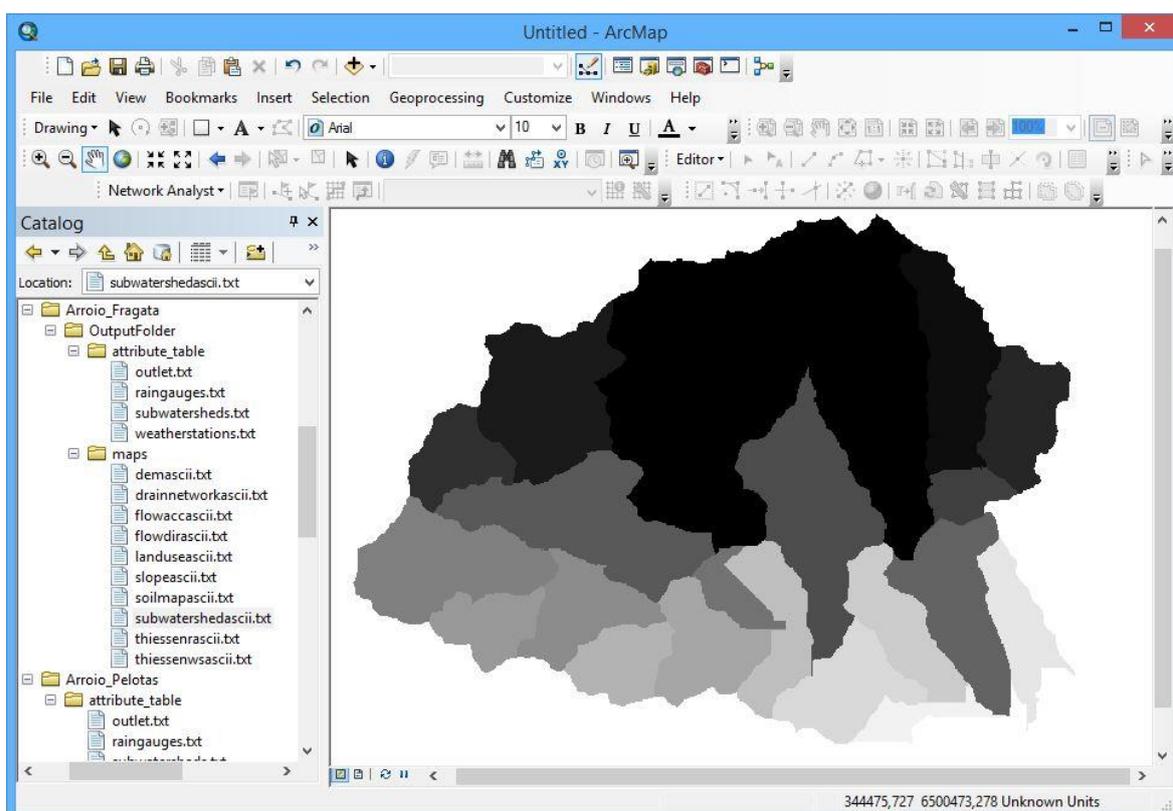


Figura 30 - Organização dos resultados gerados pelo ArcLASH para a BHAF-PC em pasta e subpastas criadas pela ferramenta, destacando as sub-bacias hidrográficas

Já as tabelas de atributos, ainda tomando como exemplo a base de dados espaciais da BHAF-PC e o ambiente de trabalho do SIG ArcGIS, podem ser visualizadas nas Figuras Figura 31, Figura 32, Figura 33 e Figura 34.

Na Figura 31 podem ser visualizados os atributos da seção de controle (outlet) da BHAF-PC, em que, da esquerda para a direita, são apresentados o código da estação pluviométrica, a coordenada X (m) de localização, a coordenada Y (m) de localização, nome, município, estado, país, altitude (m) na localização e sistema de coordenadas. As características apresentadas nos campos Field1 e Field4 a Field7 devem ser indicadas com a nomenclatura *Code*, *Name*, *City*, *State* e *Country*, respectivamente, pelo usuário através da tabela de atributos do mapa que contém o ponto da seção de controle (Figura 76), não sendo obrigatórias.

Field1	Field2	Field3	Field4	Field5	Field6	Field7	Field8	Field9
8075000	360043.748897	8490342.84458	PASSO DOS CARRO	PELOTAS	RIO GRANDE DO SUL	BRAZIL	20	SIRGAS_2000_UTM_Zone_22S

Figura 31 - Tabela de atributos da seção de controle (outlet) da BHAF-PC, visualizada no ambiente do SIG ArcGIS

A tabela de atributos das estações de monitoramento pluviométrico (Figura 32), bem como a tabela de atributos das estações de monitoramento meteorológico (Figura 33), contemplam as seguintes características (da esquerda para direita): código da estação, coordenada X (m) de localização, coordenada Y (m) de localização, nome, município, estado, país, altitude (m), sistema de coordenadas e área de influência do polígono de Thiessen (km²). Assim como o mapa da seção de controle, estes devem conter, em suas tabelas de atributos, informações referentes ao código, nome, município, estado e país, contudo, não são obrigatórias.

The screenshot shows the ArcGIS interface with the 'raingauges.txt' table open. The table contains 10 columns (Field1 to Field10) and 6 rows of data. The data includes station IDs, coordinates, station names, and geographic information.

Field1	Field2	Field3	Field4	Field5	Field6	Field7	Field8	Field9	Field10
83895	368444,6229	6483028,1004	PELOTAS INMET	PELOTAS	RIO GRANDE DO SUL	BRAZIL	14,191431	SIRGAS_2000_UTM_Zone_22S	0
1	367277,5365	6491908,5819	EMBRAPA SEDE	PELOTAS	RIO GRANDE DO SUL	BRAZIL	19,997644	SIRGAS_2000_UTM_Zone_22S	43,03594
2	355911,3303	6517891,168	EMBRAPA CASCATA	PELOTAS	RIO GRANDE DO SUL	BRAZIL	169,31244	SIRGAS_2000_UTM_Zone_22S	0
3152016	361163,9304	6505853,5619	PONTE CORDEIRO DE FARIAS	PELOTAS	RIO GRANDE DO SUL	BRAZIL	40,000004	SIRGAS_2000_UTM_Zone_22S	88,64306
3152008	388305,5547	8495175,1043	GRANJA SAO PEDRO	PELOTAS	RIO GRANDE DO SUL	BRAZIL	12,009759	SIRGAS_2000_UTM_Zone_22S	0
3152003	340870,8768	6524307,8539	CAINGUCU	CAINGUCU	RIO GRANDE DO SUL	BRAZIL	381,96039	SIRGAS_2000_UTM_Zone_22S	0

Figura 32 - Tabela de atributos das estações de monitoramento pluviométrico consideradas para análise da BHAF-PC, visualizada no ambiente do SIG ArcGIS

The screenshot shows the ArcGIS interface with the 'weatherstations.txt' table open. The table contains 11 columns (Field1 to Field11) and 3 rows of data. The data includes station IDs, coordinates, station names, and geographic information.

Field1	Field2	Field3	Field4	Field5	Field6	Field7	Field8	Field9	Field10	Field11
83895	368444,6229	6483028,1004	PELOTAS INMET	PELOTAS	RIO GRANDE DO SUL	BRAZIL	10	14,191431	SIRGAS_2000_UTM_Zone_22S	0
1	367277,5365	6491908,5819	EMBRAPA SEDE	PELOTAS	RIO GRANDE DO SUL	BRAZIL	10	19,997644	SIRGAS_2000_UTM_Zone_22S	129,761933
2	355911,3303	6517891,168	EMBRAPA CASCATA	PELOTAS	RIO GRANDE DO SUL	BRAZIL	10	169,31244	SIRGAS_2000_UTM_Zone_22S	1,917067

Figura 33 - Tabela de atributos das estações de monitoramento meteorológico consideradas para análise da BHAF-PC, visualizada no ambiente do SIG ArcGIS

As informações referentes às sub-bacias hidrográficas, processadas e armazenadas em tabela de atributos pelo ArcLASH, podem ser visualizadas na Figura 34, e contemplam, da esquerda para a direita, a identificação da sub-bacia, a coordenada X (m) do centroide da sub-bacia, a coordenada Y (m) do centroide da sub-bacia, o comprimento do curso d'água principal mais distante (m) e a declividade desse curso d'água (%). Outras variáveis, como área e perímetro da sub-bacia hidrográfica, são calculadas diretamente no ambiente do modelo LASH.

Table of contents: subwatersheds.txt

Field1	Field2	Field3	Field4	Field5
1	355991,769594	6499022,15741	11781,179688	2,41
2	352468,662666	6498053,01082	9663,227539	2,98
3	358152,159865	6498849,70346	7263,225098	3,36
4	349236,260898	6498083,99217	5740,142578	4,37
5	359694,372828	6497636,00272	3701,909912	2,76
6	347195,977533	6496699,60327	3264,337158	6,2
7	358448,662136	6495903,49885	2561,909668	1,67
8	355076,092495	6495503,6839	8126,829102	2,19
9	350076,803462	6495272,11036	8250,210938	2,49
10	358313,756959	6493442,04656	5942,863281	0,62
11	353320,842039	6493675,77454	3025,585693	1,97
12	346930,206626	6494320,74416	5290,143555	4,17
13	349996,357028	6493303,62214	4443,747559	2,33
14	347916,163709	6492996,4872	3336,763672	4,8
15	352694,14556	6492505,25699	3787,647217	1,85
16	350859,124699	6492153,20637	2931,321777	3,33
17	354101,776976	6491607,31636	4063,161133	1,64
18	357012,493174	6492947,44354	5139,261719	1,5
19	355834,690738	6491557,34823	5276,467773	0,85
20	359630,840322	6492956,17939	4871,910645	1,31
21	357347,509684	6490922,90839	4443,381836	0,65
22	358411,667361	6490385,44352	3329,484619	0,78
23	360402,247501	6491093,58462	2723,087158	0,35

976,592 762,172 Unknown Units

Figura 34 - Tabela de atributos das sub-bacias hidrográficas obtidas pelo processamento da base de dados gerais e configurações iniciais, para a BHAF-PC

Na Figura 35 e na Figura 36 são apresentados todos os mapas processados pela ferramenta ArcLASH para a BHAP e da BHAF, respectivamente.

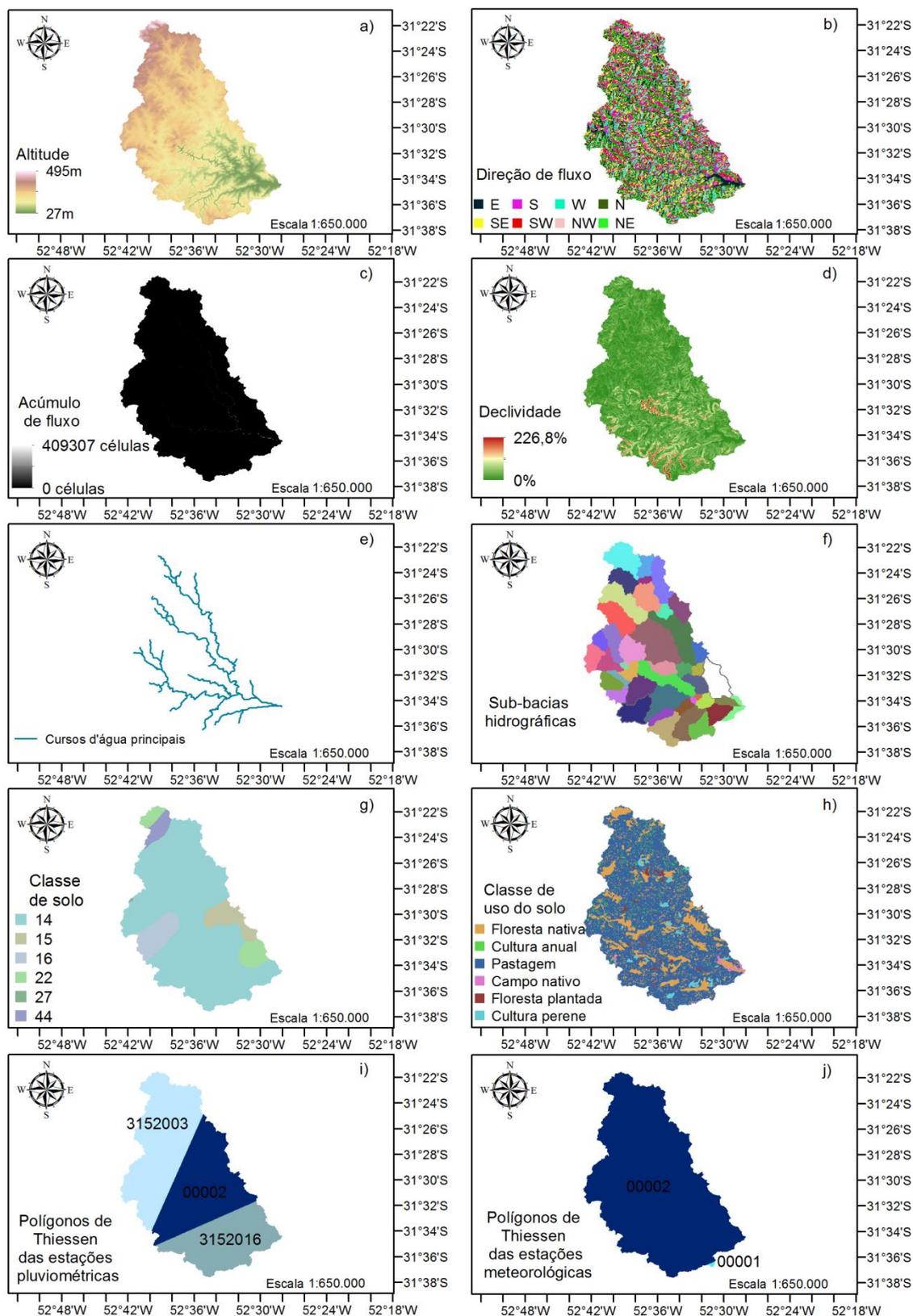


Figura 35 - Base de dados espaciais gerada pelo ArclASH para a BHAP-PCF

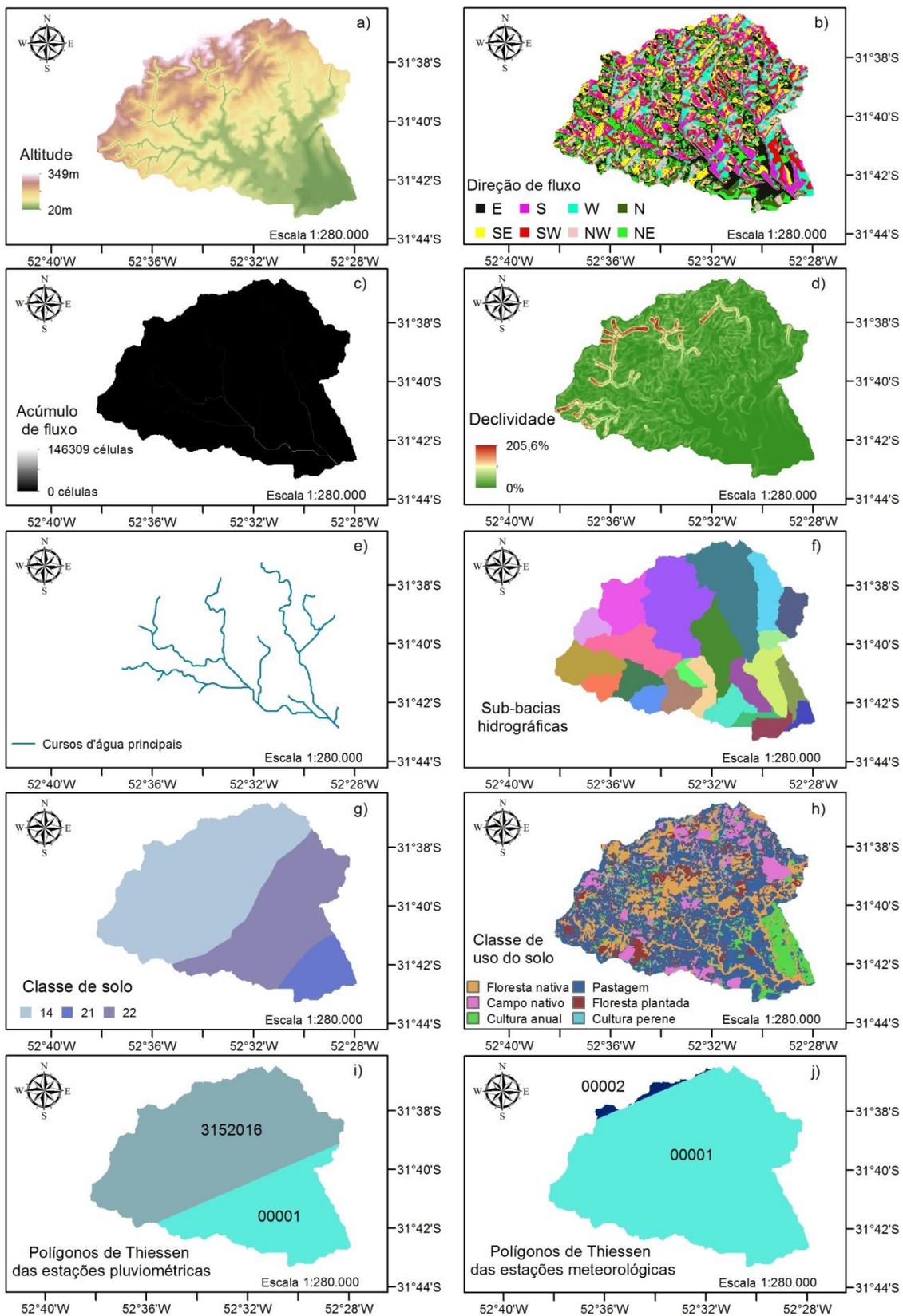


Figura 36 - Base de dados espaciais gerado pelo ArcLASH para a BHAFC-PC

O processamento das bases de dados espaciais através do ArcLASH pode ser considerado acurado, visto que os resultados de cada operação de geoprocessamento foram validados de forma manual no ambiente do ArcGIS. Deve ser enfatizado que o processamento automático com o ArcLASH tem o potencial de minimizar as chances dos usuários introduzirem erros na base de dados necessária para modelagem hidrológica no LASH, facilitando a compilação do banco de dados. É notório o quanto a compilação manual desse banco de dados é um processo detalhado e moroso que demanda uma série de operações de geoprocessamento até atingir o resultado final, onde a eficiência do processo depende diretamente do nível de experiência do usuário, principalmente no tocante à geoprocessamento.

Outro ponto favorável à utilização do ArcLASH é a rapidez com que é executado; neste estudo o tempo de processamento foi de 9 minutos e 36 segundos para a BHAF-PC e de 16 minutos e 48 segundos para a BHAP-PCF, fato este que permite compilar rapidamente bancos de dados espaciais quando da necessidade de alterar a seção de controle de interesse. Contudo, este tempo pode variar em função da área da bacia, do número de sub-bacias, da resolução do MDE e das configurações do computador.

O pedido de registro de software junto ao Instituto de Propriedade Industrial (INPI) foi depositado em 11/11/2015 (Figura 37), tendo autoria de Samuel Beskow, Tamara Leitzke Caldeira, Edison Hund Lucas, Carlos Rogério de Mello e Marcelo Ribeiro Viola, e titularidade da Universidade Federal de Pelotas e da Universidade Federal de Lavras. Em software ArcLASH foi depositado sob o número BR 5120150013092 e, desde 12/01/2016, aguarda deferimento de pedido de registro.

The screenshot shows the INPI website interface. At the top, there is a header with the Brazilian flag, the text 'BRASIL', and 'Acesso à informação'. Below this is the logo for 'Instituto Nacional da Propriedade Industrial' and 'Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior'. The main content area is titled 'Consulta à Base de Dados do INPI' and includes navigation links like '[Início | Ajuda?]' and '» Consultar por: Pesquisa Base Programas | Finalizar Sessão 1/1'. The central focus is the 'Programa de Computador' section, which lists the following details:

- Nº do Pedido: BR 51 2015 001309 2
- Data do Depósito: 11/11/2015
- Linguagem: PYTHON
- Campo de Aplicação: CC-09 / HD-01 / HD-02 / MA-02
- Tipo Programa: AP-01 , FA-01 , SM-01 , TC-01
- Título: ARCLASH
- Nome do Titular: UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS / UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
- Nome do Autor: CARLOS ROGÉRIO DE MELLO / EDISON HUND LUCAS / MARCELO RIBEIRO VIOLA / SAMUEL BESKOW / TAMARA LETZKE CALDEIRA
- Nome do Procurador:

Below the text, there are two tables. The first is 'Petições' with columns: Pgo, Protocolo, Data, Img, Serviço, Cliente, Delivery, Data. It contains one entry with a green checkmark in the 'Pgo' column.

Pgo	Protocolo	Data	Img	Serviço	Cliente	Delivery	Data
✓	016150001435	11/11/2015	-	722	UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS		-

The second table is 'Publicações' with columns: RPI, Data RPI, Despacho, Img, Complemento do Despacho. It contains one entry.

RPI	Data RPI	Despacho	Img	Complemento do Despacho
2349	12/01/2016	080	-	

At the bottom of the page, it states 'Dados atualizados até 10/02/2016 - Nº da Revista: 2353'.

Figura 37 - Sítio eletrônico do INPI, exibindo informações a respeito do pedido de registro do software Arclash

3.3. Módulo de banco de dados

Na Figura 38 pode ser visualizada a interface gráfica idealizada para o modelo LASH para cadastramento e visualização de estações de monitoramento pluviométrico, meteorológico e fluviométrico, bem como o menu e os submenus que permitem acessá-la.

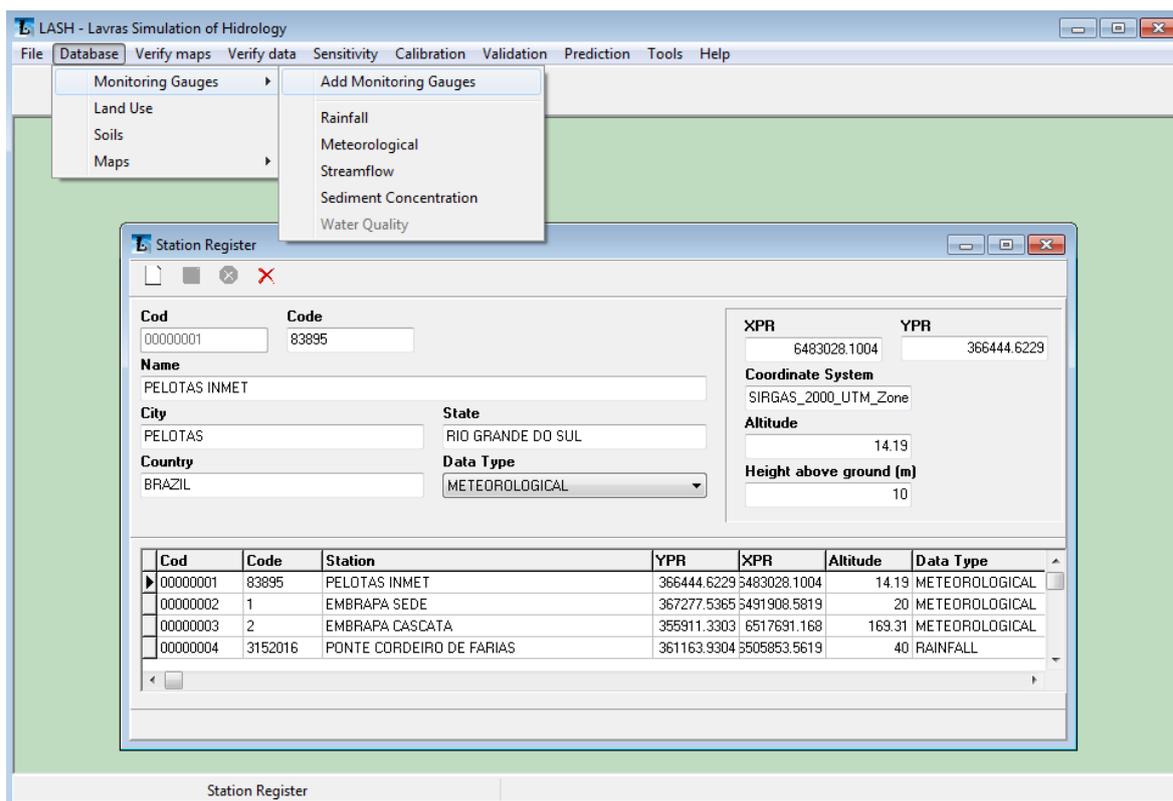


Figura 38 - Interface do modelo hidrológico LASH para cadastramento e exibição de estações pluviométricas, meteorológicas e fluviométricas cadastradas

Nesta interface (Figura 38), quando da inicialização de um novo projeto, o usuário deverá informar o código e o nome da estação de monitoramento de interesse, dados básicos acerca da localização e o tipo de variável hidrológica (pluviométrica, meteorológica ou fluviométrica) atrelada a esta estação, podendo haver uma mesma estação cadastrada para diferentes variáveis. Estas informações podem ainda serem automaticamente importadas das tabelas de atributos (Figura 31, Figura 32 e Figura 33) processadas pelo ArcLASH, conforme apresentado na seção 3.2.

As interfaces de importação e visualização das séries históricas pluviométricas, meteorológicas e fluviométricas podem ser visualizadas nas Figura 39, Figura 40 e Figura 41. Estes ambientes permitem ao usuário vincular séries de dados às estações cadastradas por meio de arquivo no formato *.xls, tal como aquele exportado pelo SYHDA (seção 3.1), devendo este não conter cabeçalho de identificação dos campos, haja vista que estas informações devem ser indicadas quando do processo de importação. Além disso, o usuário pode

limpar o banco de dados cadastrados, exportar séries históricas e visualizá-las em diferentes intervalos de tempos.

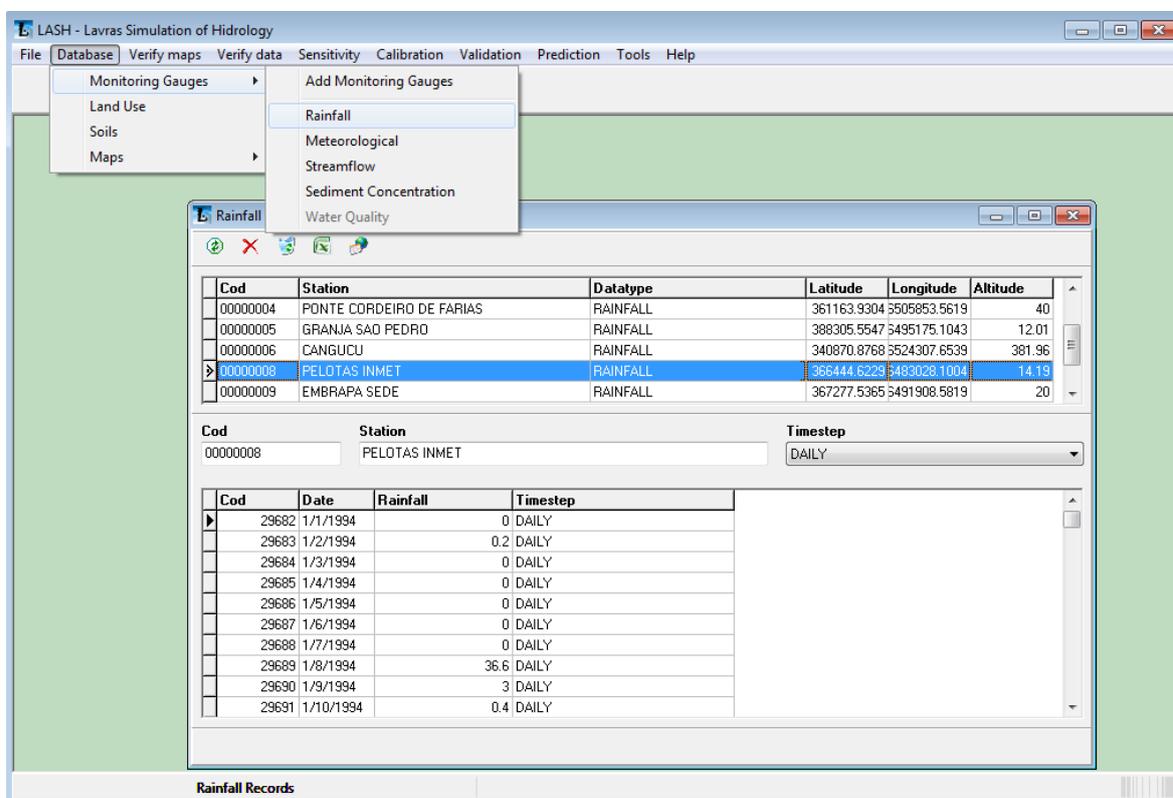


Figura 39 - Interface do modelo hidrológico LASH para importação e visualização de série histórica de dados pluviométricos

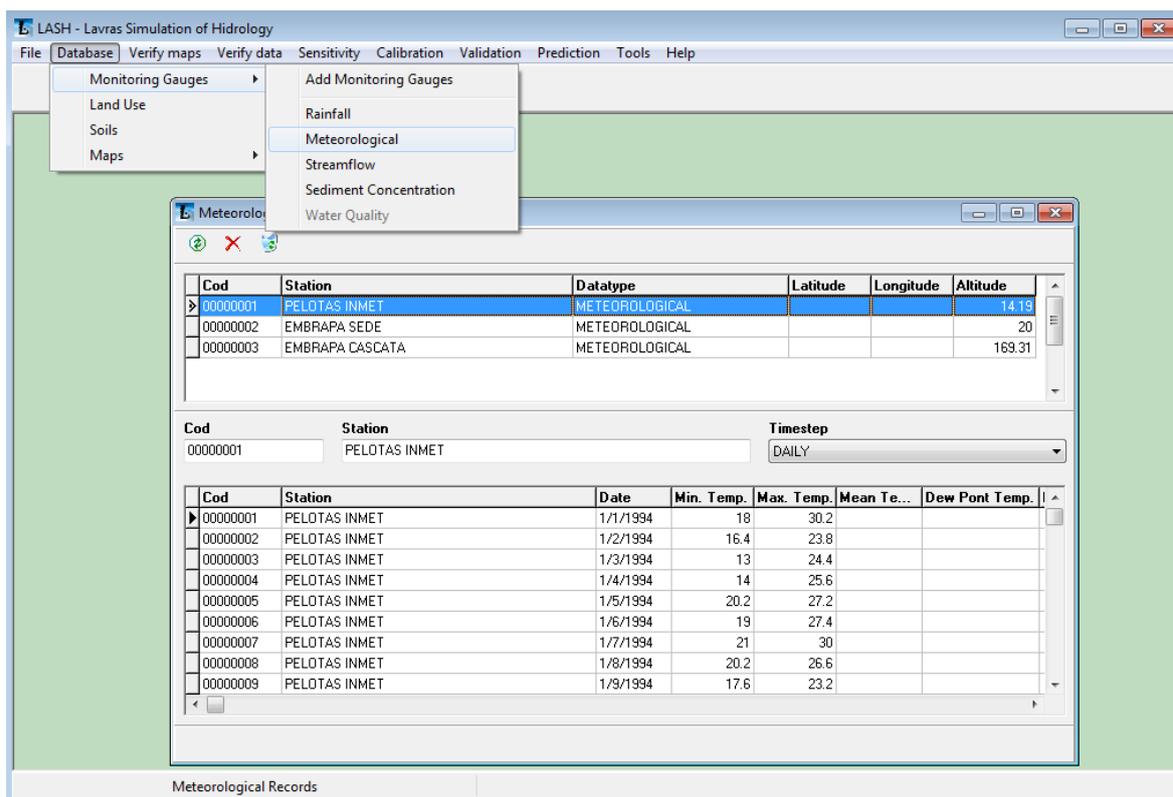


Figura 40 - Interface do modelo hidrológico LASH para importação e visualização de série histórica de dados meteorológicos

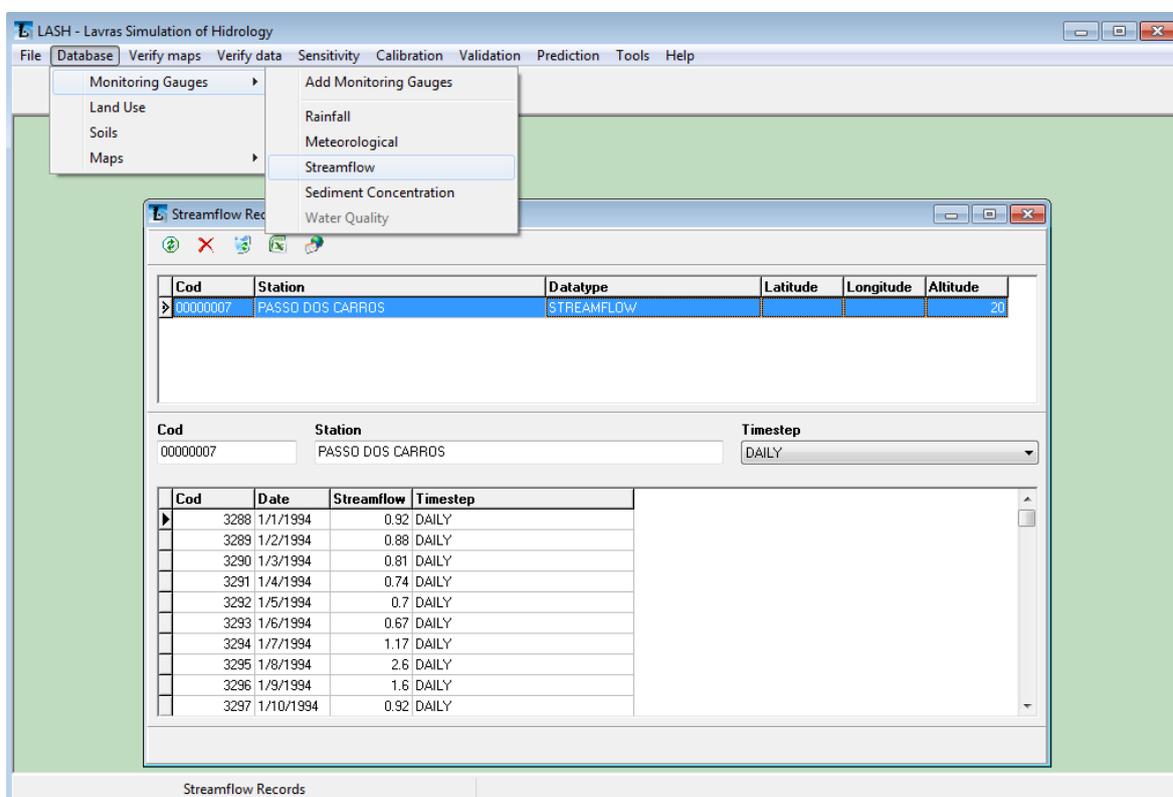


Figura 41 - Interface do modelo hidrológico LASH para importação e visualização de série histórica de dados fluviométricos

Já o banco de dados de uso do solo recebe as informações cadastradas pelo usuário nas interfaces exibidas na Figura 42 e na Figura 43. No primeiro ambiente (Figura 42) ocorre o cadastramento das classes de uso do solo, podendo o usuário editar ou excluir o que foi cadastrado, enquanto que no segundo ambiente (Figura 43), para uma das classes de uso do solo cadastradas, selecionada na guia *Name Register*, pode-se atrelar as variáveis índice de área foliar (*Leaf Area Index* – $m.m^{-2}$), altura (*Height* - m), albedo (*Albedo*), resistência estomática (*Surface resistance* $s.m^{-1}$), profundidade do sistema radicular (*Root Depth* – mm), coeficiente de cultura (*kc*), coeficiente de rugosidade (*Roughness Coef.*), coeficiente de interceptação (*Interception Coef.*) e coeficiente de abstração inicial (*IAC*).

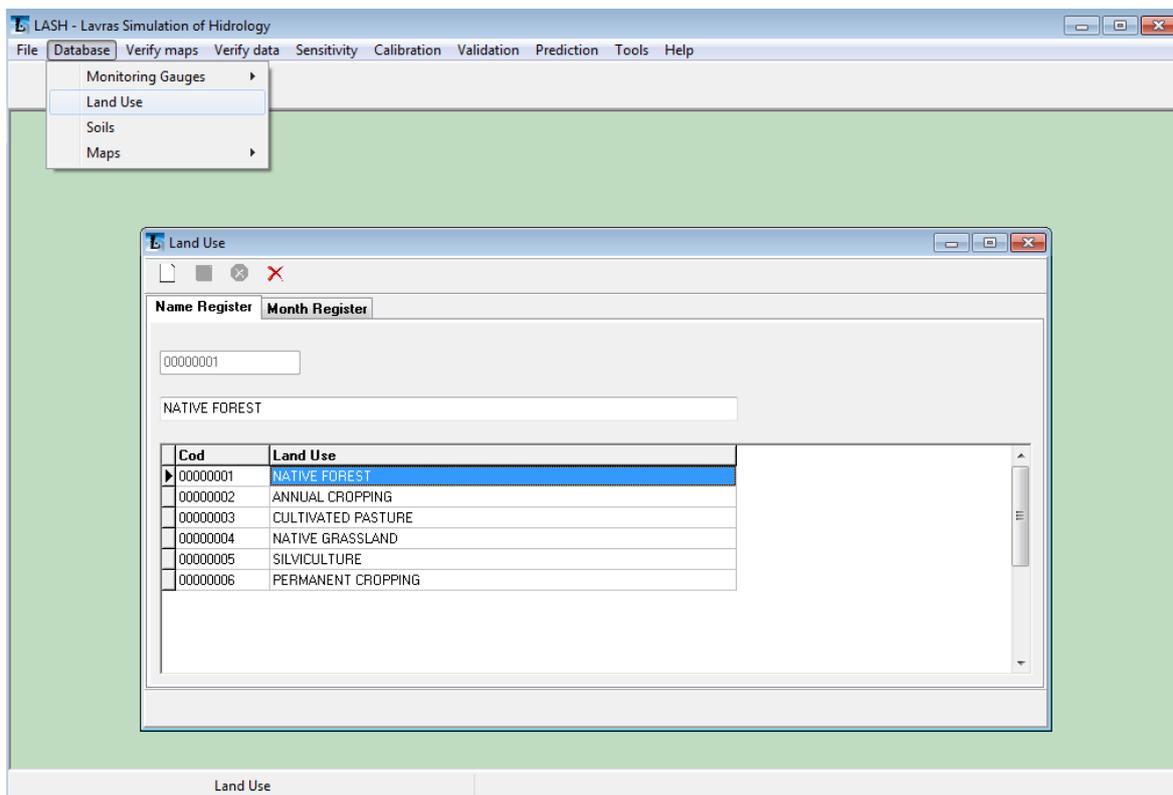


Figura 42 - Interface do modelo hidrológico LASH para cadastramento de usos do solo

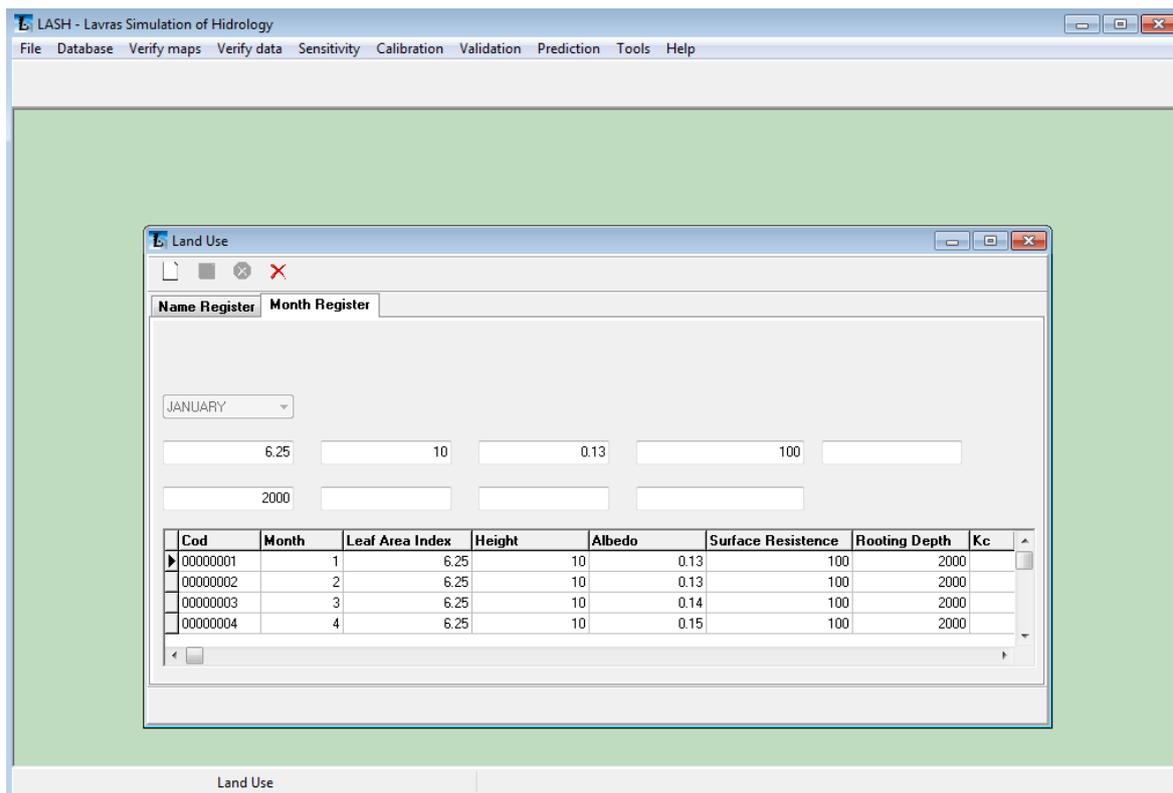


Figura 43 - Interface do modelo hidrológico LASH para cadastramento de variáveis atreladas ao uso do solo

Por fim, na Figura 44 pode-se visualizar a interface idealizada para o modelo hidrológico LASH para cadastramento e visualização de classes de solo e das variáveis associadas a essas classes, podendo o usuário cadastrar uma nova classe, editar ou excluir. Cabe salientar que a terceira versão do modelo LASH permite ao usuário inserir algumas destas variáveis por meio de mapas, contemplando assim suas variabilidades espaciais. Estas variáveis são θ_s (Map of saturation soil moisture content), θ_{PMP} (Map of permanent wilting point soil moisture content), θ_A (Map of current soil moisture content), na unidade de volume de água por volume de solo, e profundidade do solo (Soil Depth), na unidade de milímetros, exibidas na interface (Figura 44) como SSWC, PWPSWC, At e *Soil Depth*, respectivamente.

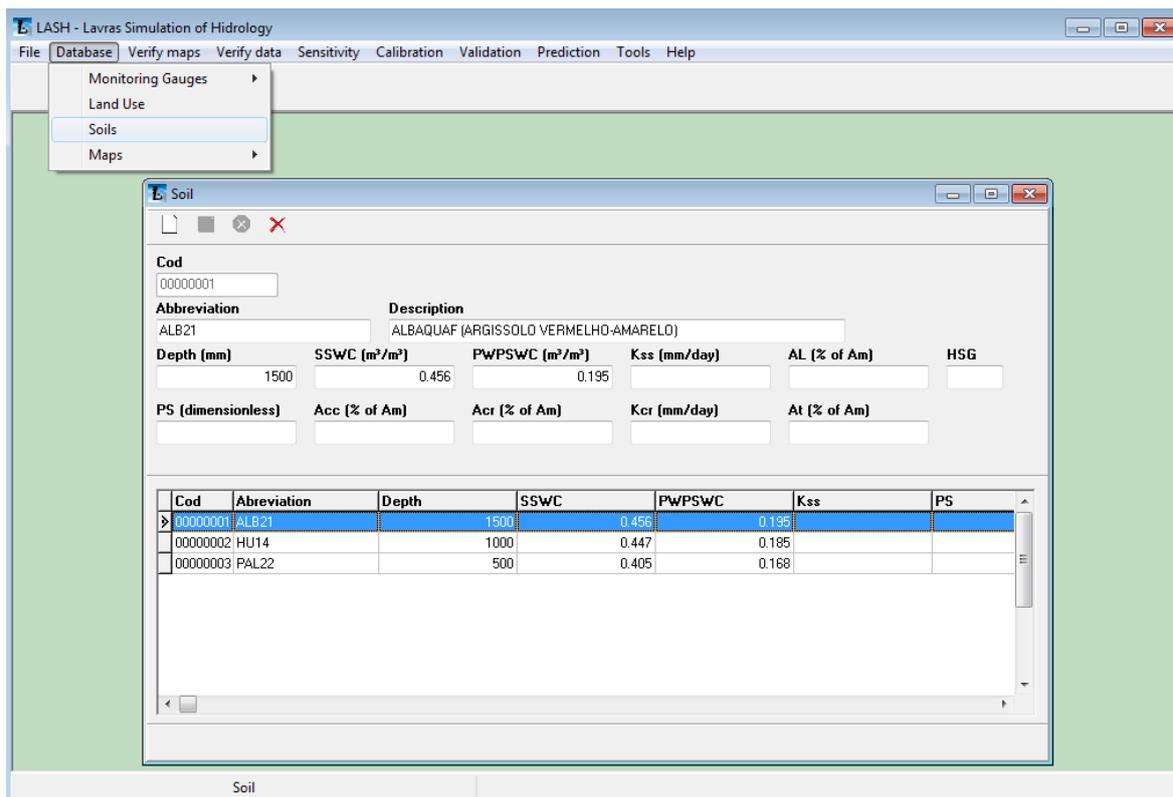


Figura 44 - Interface do modelo hidrológico LASH para cadastramento de classes de solo e de variáveis atreladas a estas classes

As variáveis atreladas às classes de uso do solo e de solo são vinculadas aos mapas de uso do solo e de solo, respectivamente, por meio do módulo de integração, descrito na seção 2.5 e apresentado na seção 3.4.

Do ponto de vista hidrológico, um dos grandes diferenciais da terceira versão do LASH, contemplado no desenvolvimento do módulo de banco de dados e na adequação das rotinas hidrológicas, tange à possibilidade de considerar a distribuição espacial da chuva e de variáveis meteorológicas, haja vista que na sua primeira versão apenas uma estação pluviométrica e uma estação meteorológica podiam ser empregadas. Considerando que todos os componentes hidrológicos do modelo fundamentam-se em informações acerca dessas variáveis, será possível contemplar a variabilidade espacial da chuva e do clima e, conseqüentemente, simular processos hidrológicos de forma mais realística, principalmente em bacias hidrográficas de grande porte.

Além disso, outro grande diferencial que deve ser ressaltado, principalmente quando se compara a terceira versão do modelo LASH à outros modelos hidrológicos, é a possibilidade de o usuário considerar a variabilidade

temporal, em escala mensal, das variáveis associadas ao uso do solo, sendo especialmente relevante para a simulação hidrológica quando da existência de cultivo anual na bacia hidrográfica, uma vez que culturas deste tipo têm variáveis, como altura de planta e IAF, bastante oscilantes ao longo do ano.

3.4. Módulo de integração

Na Figura 45 pode-se visualizar, no ambiente do modelo hidrológico LASH, a interface idealizada para importação automática de mapas e tabelas de atributos processados com o emprego da ferramenta ArcLASH, bem como o menu que permite ao usuário acessá-la.

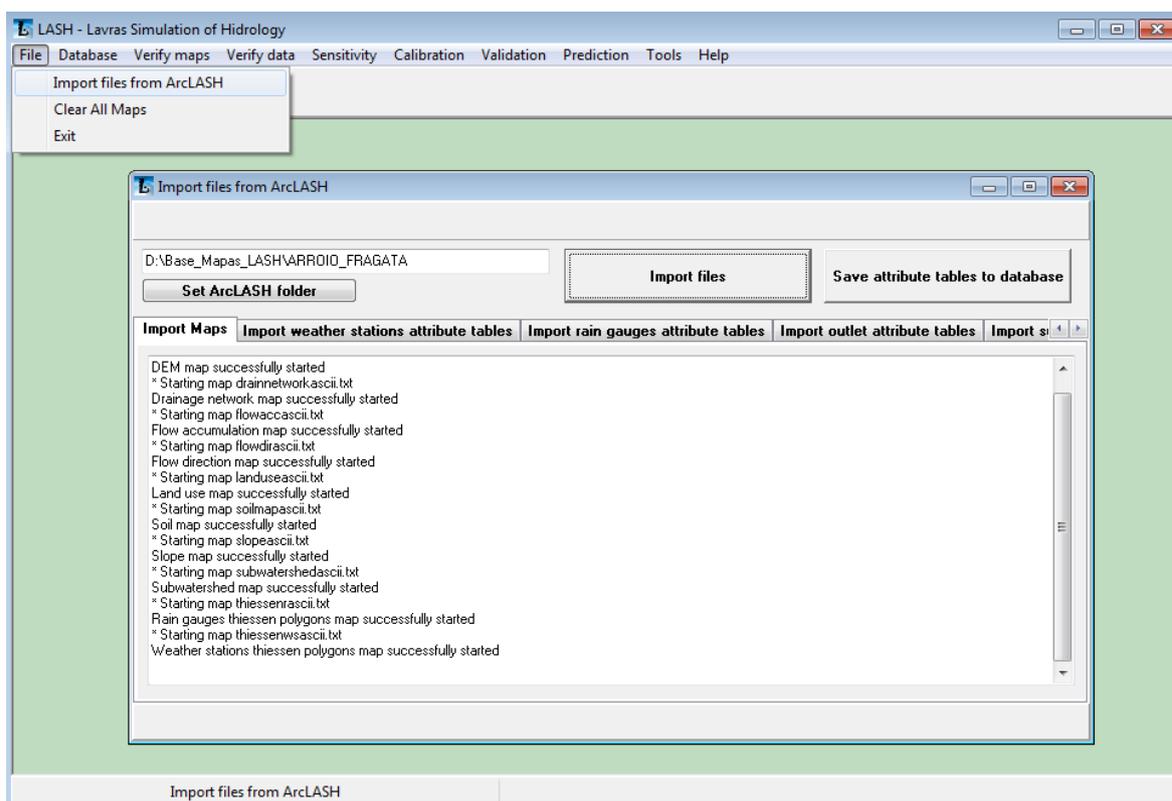


Figura 45 - Interface de importação da base de dados espaciais processada pelo ArcLASH

Nesta interface (Figura 45), o usuário deverá indicar, em *Set ArcLASH folder*, o caminho do diretório onde encontram-se armazenadas a pasta “OutputFolder” e suas subpastas “maps” e “attribute_table”, as quais são

automaticamente criadas pelo ArcLASH, sendo imprescindível, por parte do módulo de integração, manter a nomenclatura mencionada.

Após indicar o caminho da pasta principal, o processo de importação da base de dados espaciais ocorrerá ao clique do botão *Import files* (Figura 45), exibindo instantaneamente, na guia *Import Maps*, o progresso da aquisição dos mapas. Já as tabelas de atributos das estações meteorológicas, das estações pluviométricas, da seção de controle e das sub-bacias hidrográficas podem ser visualizadas nas guias *Import weather stations attribute tables* (Figura 46), *Import rain gauges attribute tables* (Figura 47), *Import outlet attribute tables* (Figura 48) e *Import subwatersheds attribute tables* (Figura 49), respectivamente, sendo as informações contidas nestas tabelas armazenadas no banco de dados do modelo LASH ao clique do botão *Save attribute tables to database*.

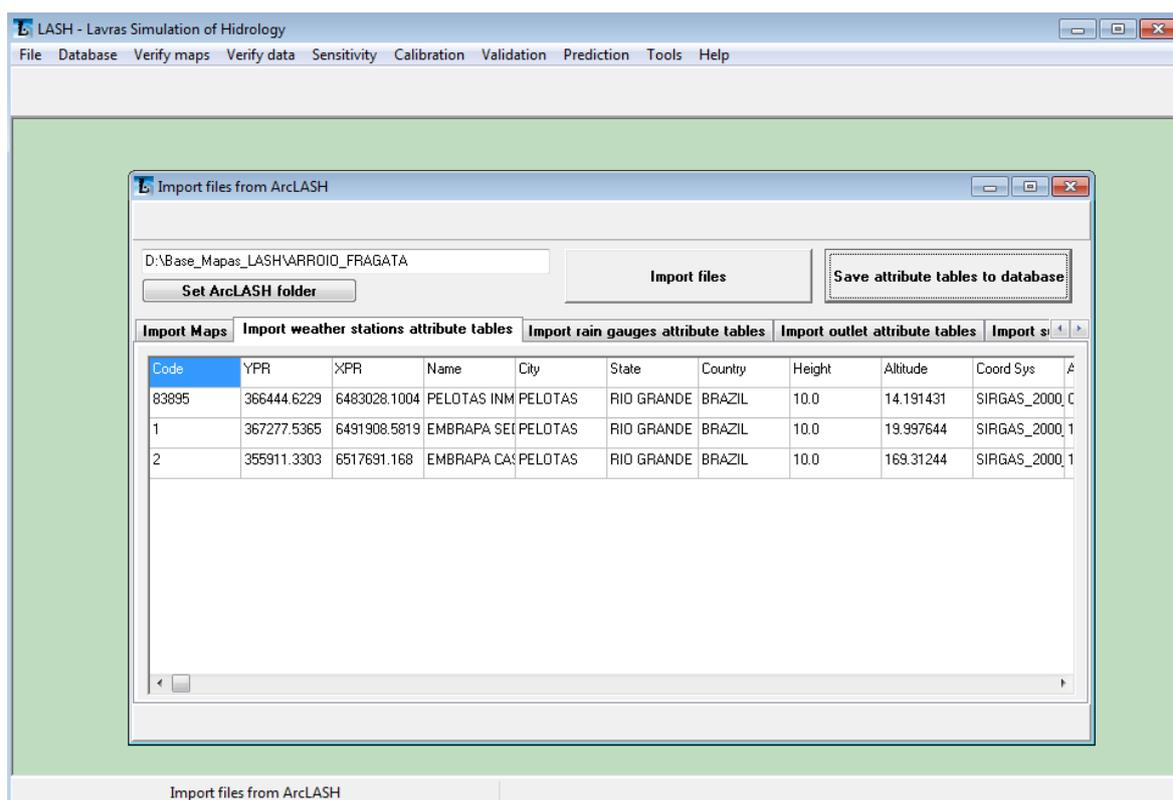


Figura 46 - Interface de visualização da tabela de atributos das estações meteorológicas que compõem a base de dados espaciais processada através do ArcLASH

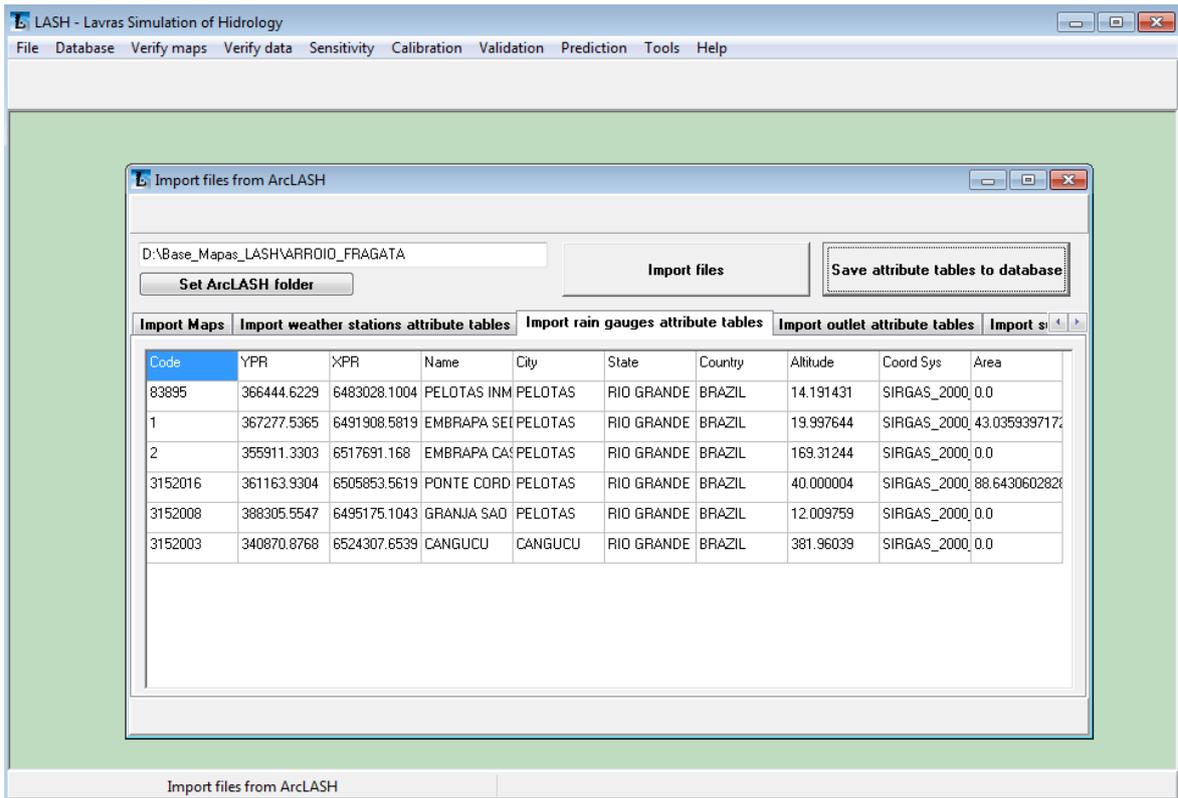


Figura 47 - Interface de visualização da tabela de atributos das estações pluviométricas que compõem a base de dados espaciais processada através do ArcLASH

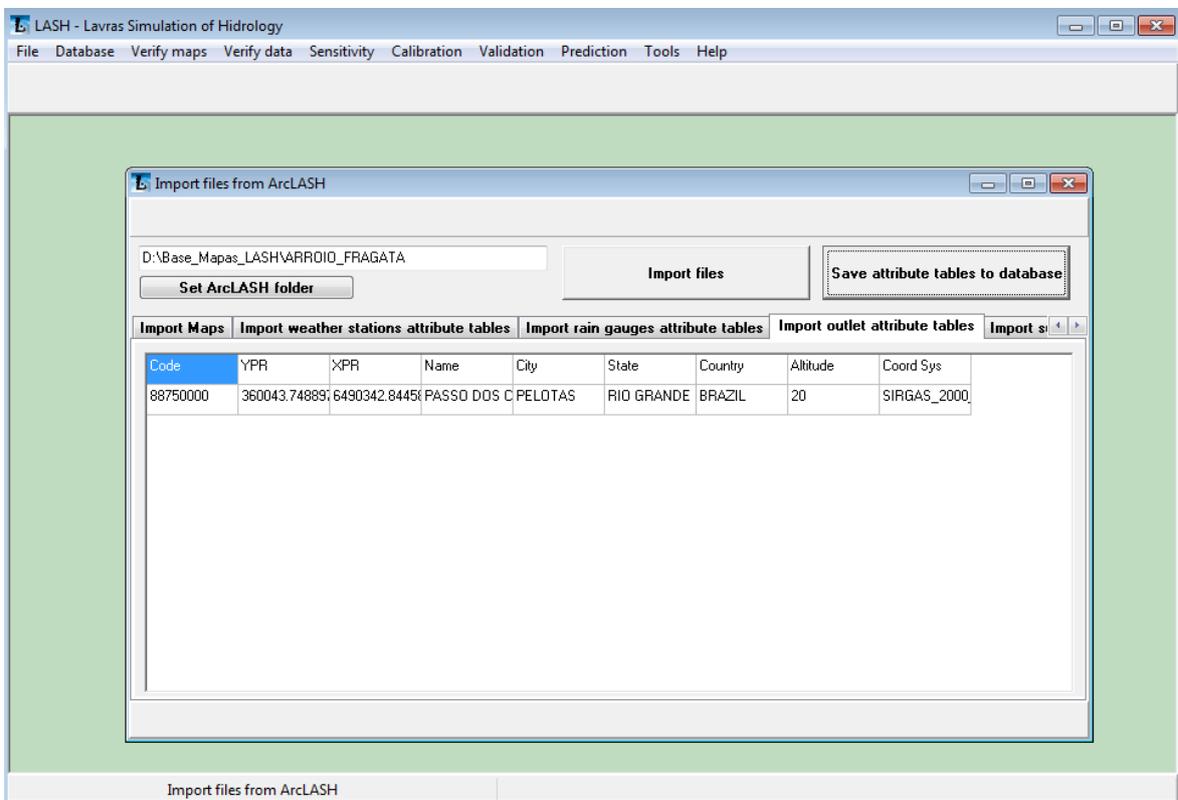


Figura 48 - Interface de visualização da tabela de atributos da seção de controle que compõem a base de dados espaciais processada através do ArcLASH

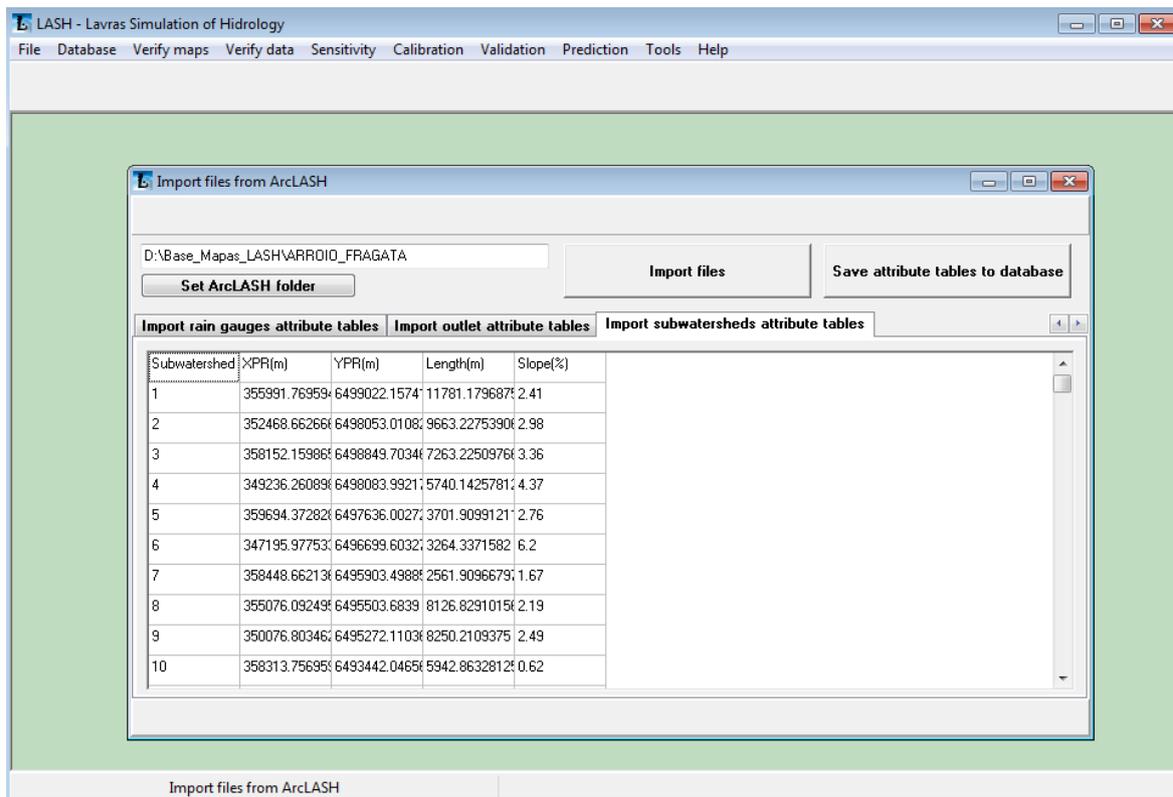


Figura 49 - Interface de visualização da tabela de atributos das sub-bacias hidrográficas que compõem a base de dados espaciais processada através do ArcLASH

Uma vez importada a base de dados espaciais, o usuário poderá visualizar cada um dos mapas, no ambiente do modelo hidrológico LASH, através do menu *Database*, submenu *Maps*, onde estão dispostos os itens que permitem acessar as interfaces específicas e suas funcionalidades, a saber:

- i. *Hydrologically Consistent DEM* – ilustrada na Figura 50, permite a visualização do MDE-HC, e apresenta, além do mapa, a legenda em escala de cinza, com os valores mínimo, mediano e máximo de altitude, em metros, dentre outras opções;
- ii. *Slope* – ilustrada na Figura 51, possibilita visualizar o mapa de declividade do terreno e sua legenda com escala de valores percentuais;
- iii. *Flow Direction* – ilustrada na Figura 52, permite visualizar o mapa de direção de fluxo da bacia hidrográfica e sua legenda, a qual integra os valores padrões do raster aos pontos cardiais e colaterais que indicam o sentido preferencial do fluxo, considerando sempre a

seguinte correspondência: 1 – E (leste); 2 – SE (sudeste); 4 – S (sul); 8 – SW (sudoeste); 16 – W (oeste); 32 – NW (noroeste); 64 – N (norte); e 128 – NE (nordeste);

- iv. *Flow Accumulation* – ilustrada na Figura 53, é uma interface que exhibe o mapa de acúmulo de fluxo e sua legenda, onde o valor máximo desta indica o número de células que drenam ao exutório da bacia;
- v. *Drainage Network* – ilustrada na Figura 54, permite visualizar o mapa de rede de drenagem;
- vi. *Subwatershed* – ilustrada na Figura 55, exhibe o mapa de sub-bacias hidrográficas e sua legenda;
- vii. *Thiessen Polygons > Rain Gauges* – ilustrada na Figura 56, permite visualizar o mapa de polígonos de Thiessen das estações pluviométricas e sua legenda, a qual atrela, à cada cor da feição, o código da estação que exerce influência sobre a bacia;
- viii. *Thiessen Polygons > Weather Stations* – ilustrada na Figura 57, permite visualizar o mapa de polígonos de Thiessen das estações meteorológicas e sua legenda, que assim como a anterior, relaciona a cor da feição ao código da estação que exerce influência sobre a bacia;
- ix. *Land Use* – ilustrada na Figura 58, exhibe o mapa de classes de uso do solo e uma legenda iterativa, a qual contém uma lista suspensa, atrelada ao banco de dados de uso do solo, que disponibiliza opções de classes de uso do solo cadastradas pelo usuário, permitindo salvar (*Save land use*) ou então limpar (*Clear land use*) uma configuração indicada;
- x. *Soil* – ilustrada na Figura 59, permite visualizar o mapa de classes de solo e sua legenda iterativa, a qual contém uma lista suspensa, vinculada ao banco de dados de solo, disponibilizando opções de classes de solo cadastradas pelo usuário, permitindo salvar (*Save soil*) ou então limpar (*Clear soil*) uma configuração indicada;

- xi. *Current soil moisture content* – exibe uma interface onde se pode visualizar o mapa de conteúdo atual de água no solo e sua legenda, considerando a unidade de volume de água por volume do solo;
- xii. *Saturation soil moisture content* – possibilita visualizar o mapa de conteúdo de água no ponto de saturação do solo e sua legenda, para valores na unidade de volume de água por volume do solo;
- xiii. *Permanent wilting point soil moisture content* - exibe uma interface onde pode-se visualizar o mapa de conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente e sua legenda, na unidade de volume de água por volume do solo; e
- xiv. *Soil depth* - permite visualizar o mapa de profundidade do solo e sua legenda, considerando a variável na unidade de milímetros.

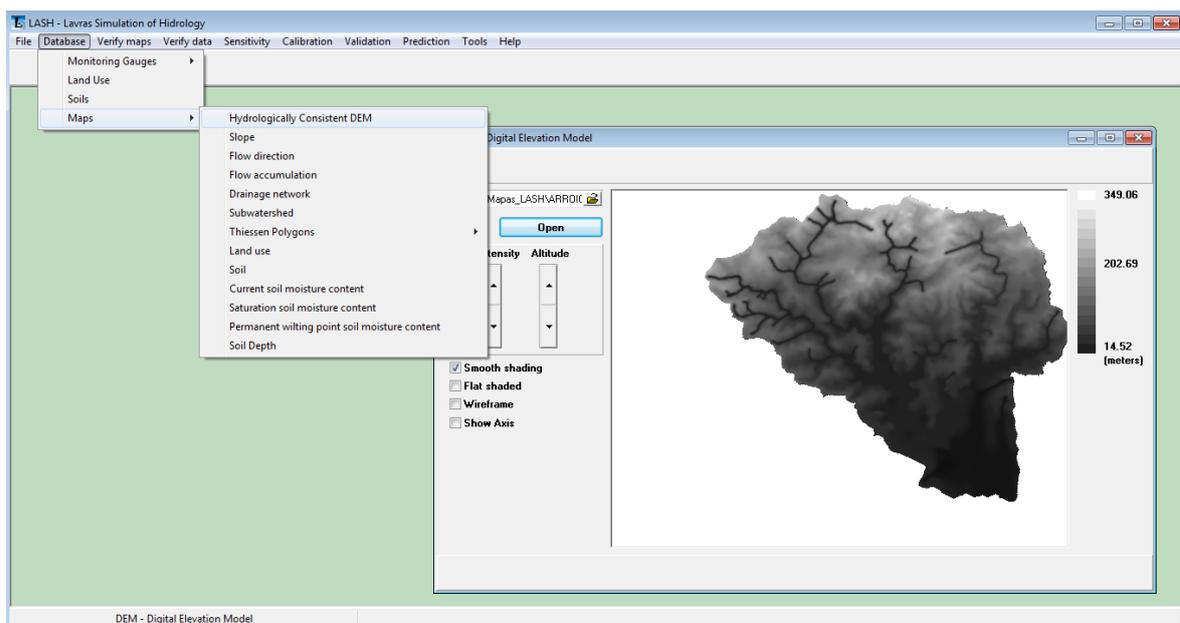


Figura 50 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente

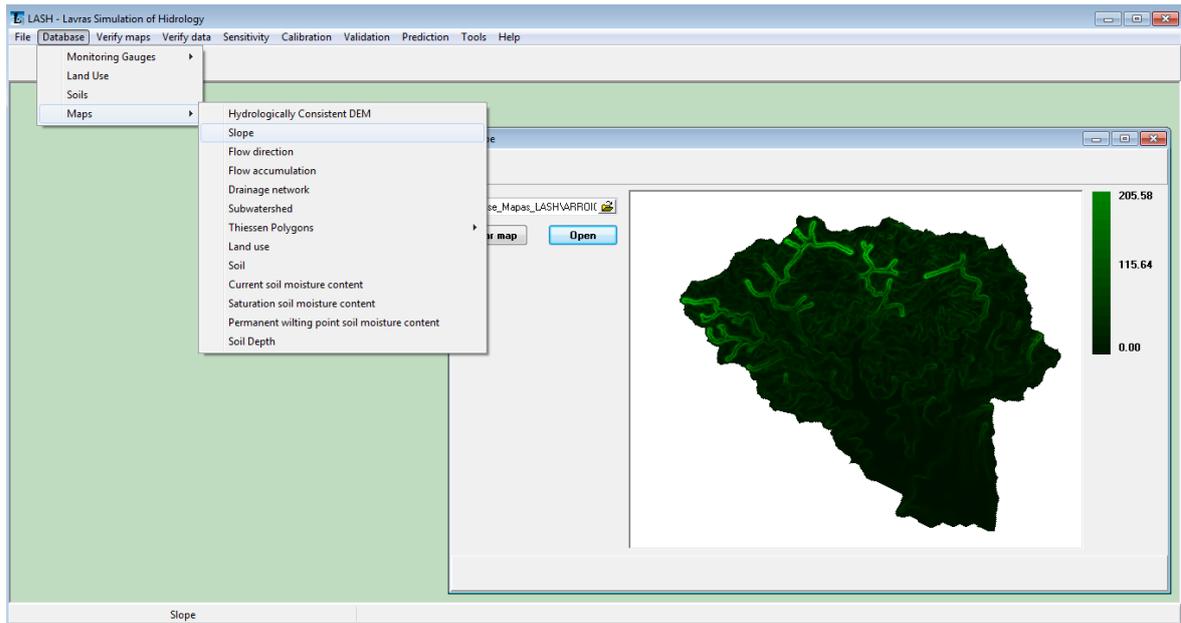


Figura 51 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de declividade do terreno

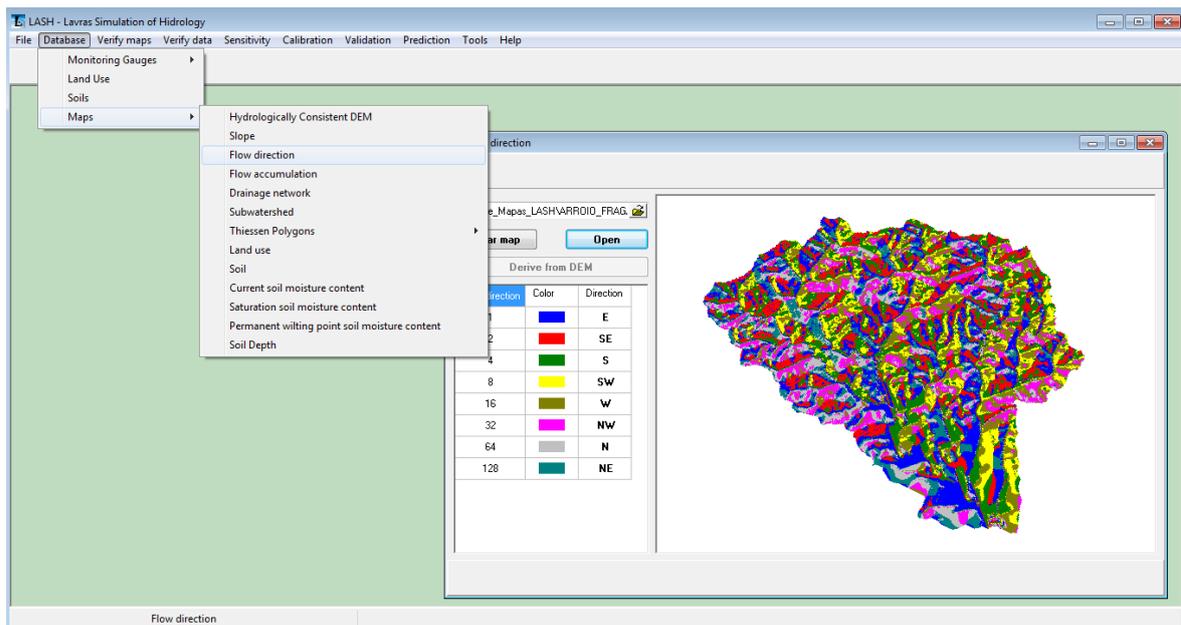


Figura 52 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de direção de fluxo

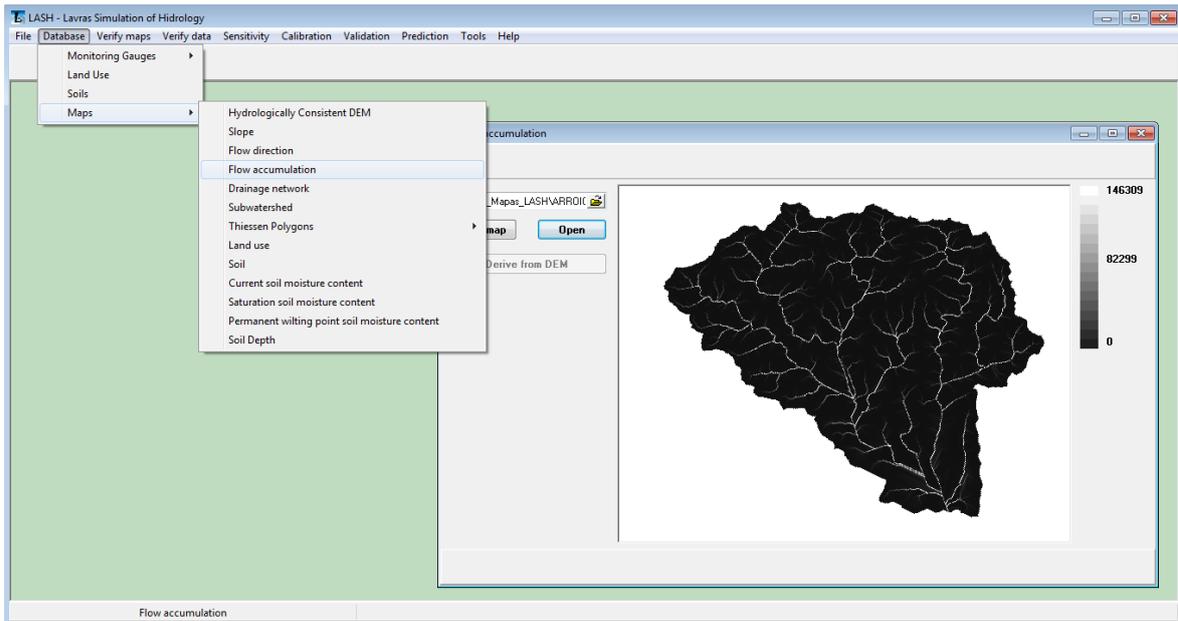


Figura 53 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de acúmulo de fluxo

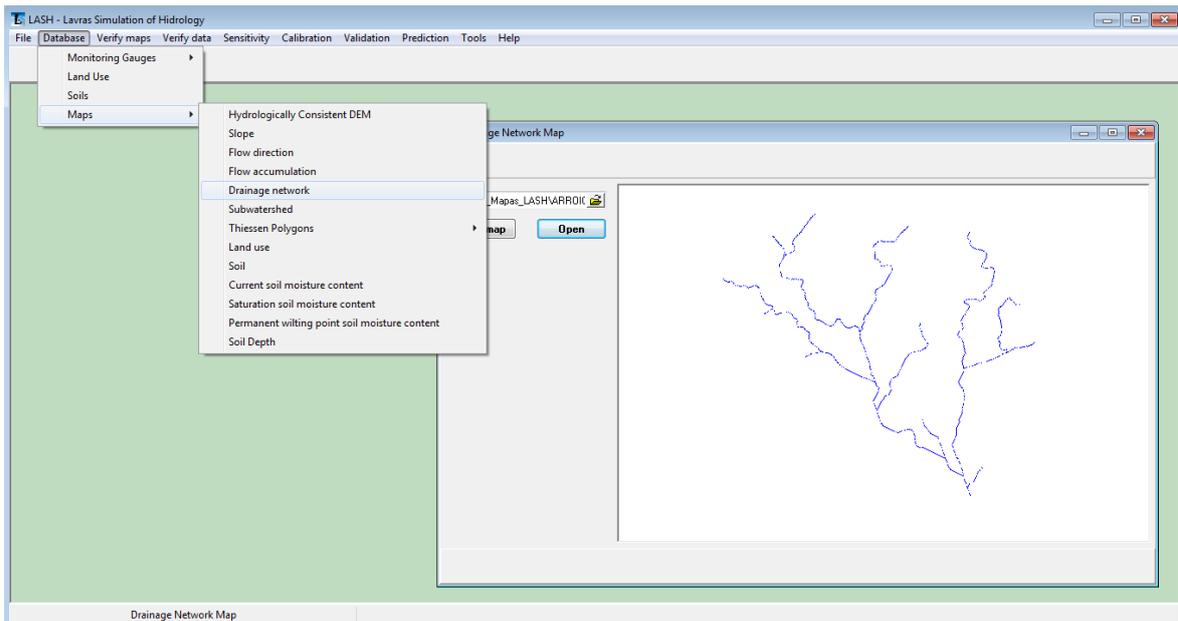


Figura 54 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de rede de drenagem

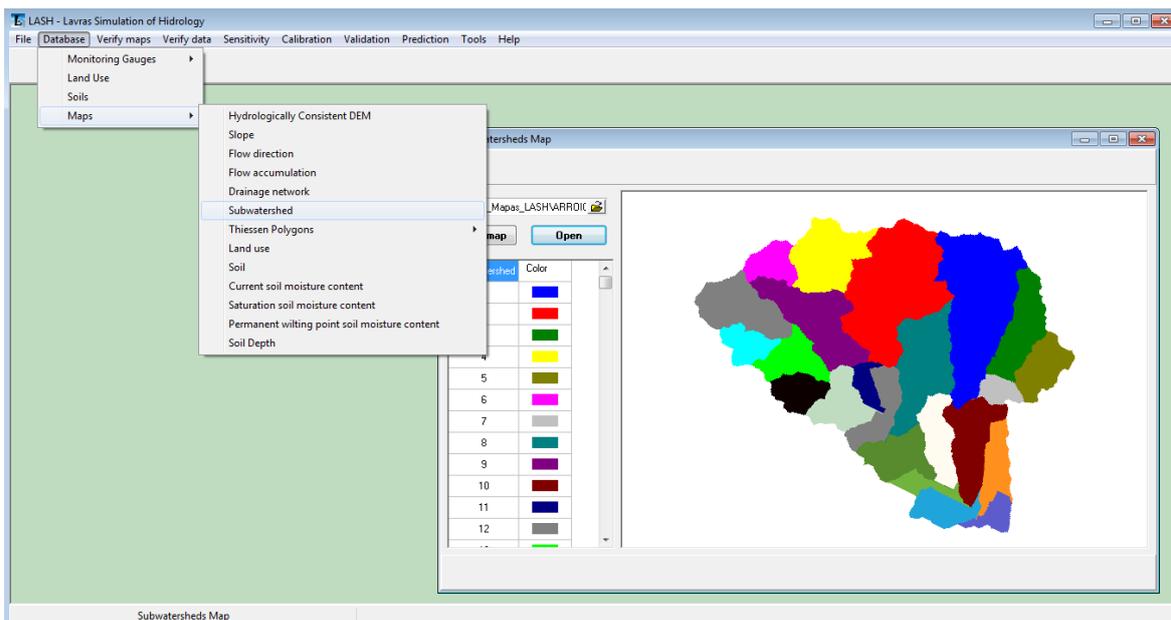


Figura 55 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de sub-bacias hidrográficas

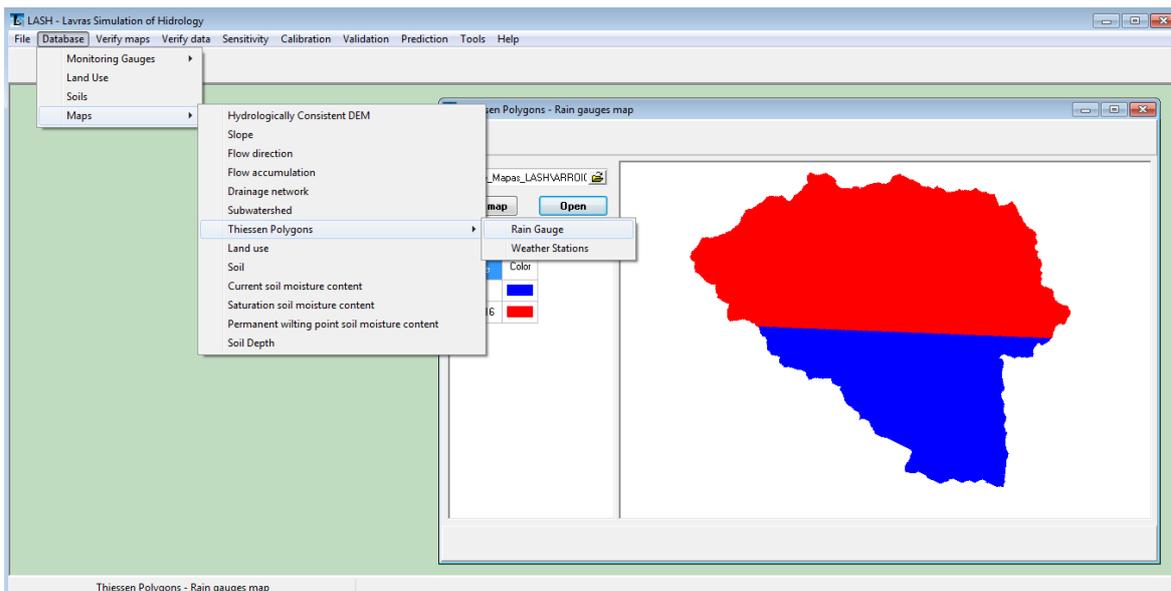


Figura 56 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de polígonos de Thiessen das estações pluviométricas

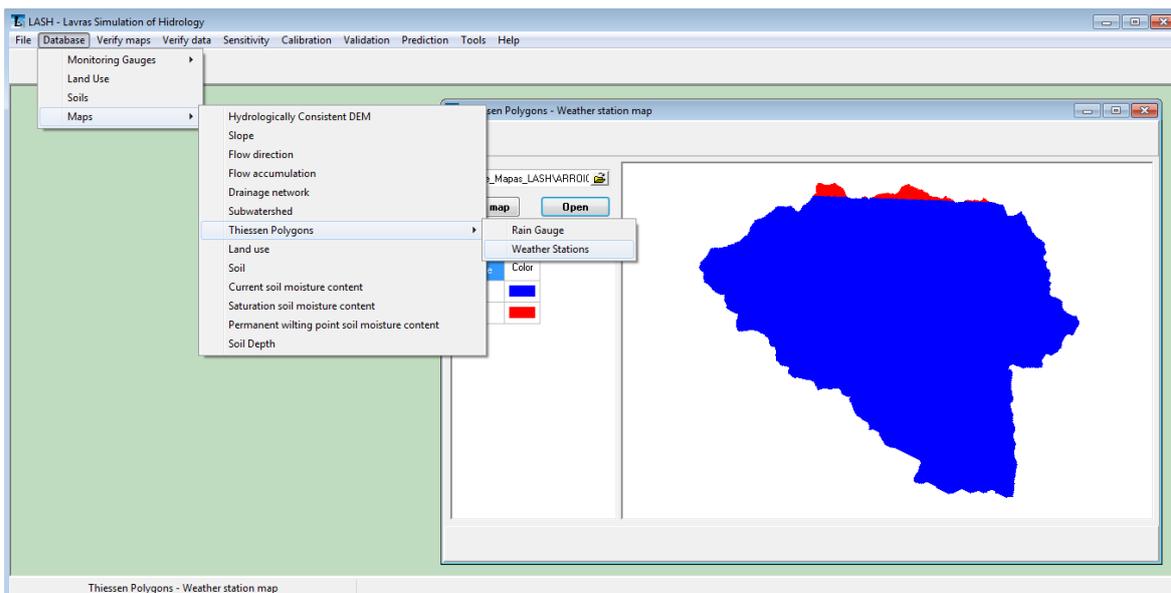


Figura 57 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de polígonos de Thiessen das estações meteorológicas

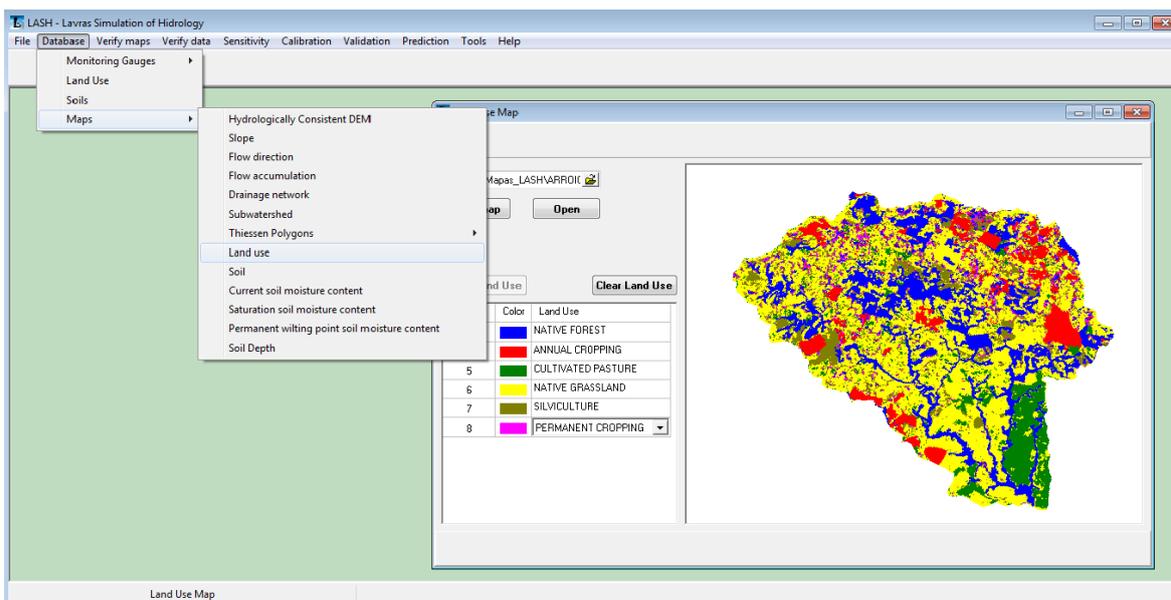


Figura 58 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de classes de uso do solo

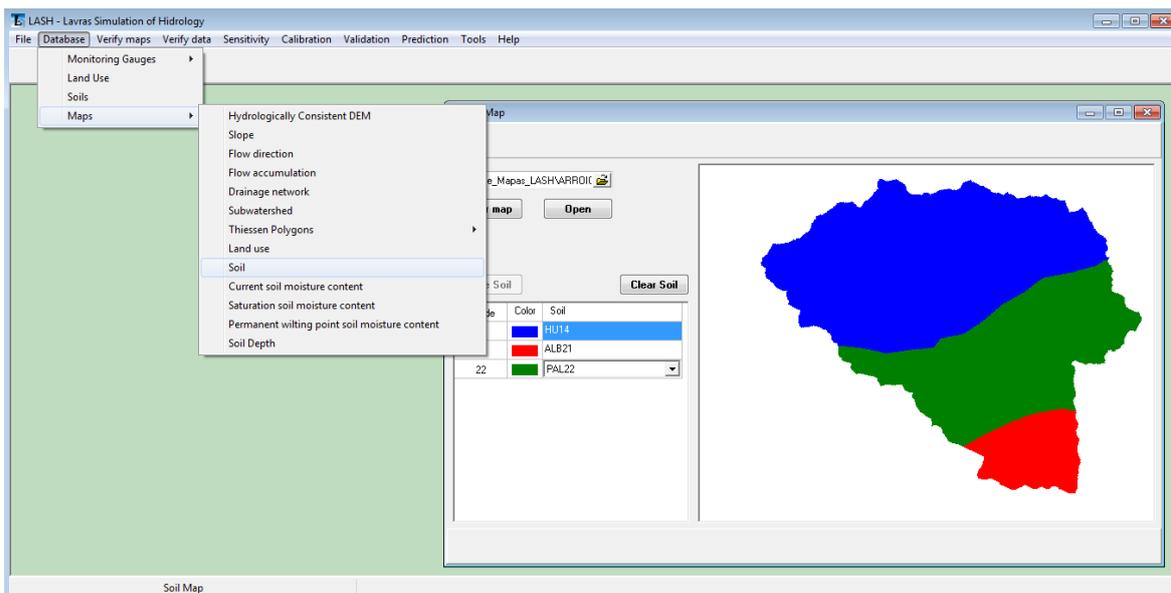


Figura 59 - Interface do modelo hidrológico LASH idealizada para visualização do mapa de classes de solo

Todas as interfaces acima mencionadas e ilustradas apresentam opções de arraste e zoom na área de exibição do mapa. Além disso, estas interfaces permitem também a substituição de um mapa importado automaticamente da base de dados processada pelo ArcLASH ou ainda importação de um mapa elaborado pelo usuário sem o emprego da referida ferramenta.

Uma vez importados os mapas e tabelas de atributos, bem como cadastrados os dados referentes às classes de uso do solo e de solo, o módulo de integração permite caracterizar automaticamente as sub-bacias hidrográficas, etapa esta que é de suma importância, visto que são as unidades de análise hidrológica da terceira versão do modelo e que é necessário obter parâmetros específicos para cada uma delas.

No ambiente do modelo LASH, o menu *Verify maps* exibe uma tela (Figura 60) onde estão dispostas 5 guias: *Subwatersheds*, *Land Use*, *Soil*, *Thiessen Polygons Rain Guages* e *Thiessen Polygons Weather Stations*. Acima dessas guias encontram-se 3 ícones que, da esquerda para a direita, permitem, respectivamente, executar a rotina de compilação automática de variáveis por sub-bacia hidrográfica, preenchendo as guias mencionadas, apagar as variáveis processadas e exportar cada conjunto de variáveis, dependendo da guia exibida, para uma planilha eletrônica, no formato *.xls.

The screenshot shows the LASH software interface with a table titled 'Subwatersheds'. The table contains 23 rows of data, each representing a subwatershed. The columns are: Cod, Subwatersheds, Avg. Altitude (m), Delta H (m), Perimeter (km), XPR, YPR, Avg. Slope (%), Stream Length (m), Stream Slope (%), TC (Min), and Area (km²). The row for 'Subwatersheds' 23 is highlighted in blue.

Cod	Subwatersheds	Avg. Altitude (m)	Delta H (m)	Perimeter (km)	XPR	YPR	Avg. Slope (%)	Stream Length (m)	Stream Slope (%)	TC (Min)	Area (km²)
00000001	1	146.18	294.19	29.4	355991.77	6459022.16	16.64	11781.18	2.41	110.33	18.288
00000002	2	170.75	310.55	27.78	352468.66	6498053.01	21.44	9663.23	2.98	85.94	19.2582
00000003	3	120.67	244.61	16.86	359152.16	6498849.7	10.24	7263.23	3.36	67.75	6.417
00000004	4	187.6	273.3	17.7	349236.26	6498083.99	31.18	5740.14	4.37	49.47	8.5365
00000005	5	85.9	110.21	11.64	359694.37	64597636	12.25	3701.91	2.76	42.26	4.2957
00000006	6	191.54	230.18	10.68	347195.98	6496699.6	18.69	3264.34	6.2	27.54	3.231
00000007	7	56.04	79.66	7.86	358448.66	6495903.5	7.29	2561.91	1.67	31.32	1.7217
00000008	8	92.88	182.76	21.72	350076.09	6495603.68	8.88	8126.83	2.19	86.3	9.4473
00000009	9	113.13	207.57	21.72	350076.8	6495272.11	18.9	8250.21	2.49	83.61	9.1746
00000010	10	34.73	65.13	16.8	358313.76	6493442.05	4.36	9542.86	0.62	89.44	6.2046
00000011	11	53.68	62.87	8.88	353202.84	6493675.77	5.62	3025.59	1.97	41.57	1.6461
00000012	12	152.63	228.65	16.02	348930.21	6494320.74	24.66	5290.14	4.17	48.22	7.2729
00000013	13	87.37	108.71	13.26	349598.36	6493303.62	15.99	4443.75	2.33	52.49	4.1148
00000014	14	114.91	170.94	9.78	347916.16	6452396.49	32.94	3336.76	4.8	31.67	2.8764
00000015	15	69.3	75.74	12.78	352838.15	6495205.26	9.08	3787.65	1.85	50.16	4.3659
00000016	16	88.54	101.63	9.06	359859.12	6492153.21	11.92	2931.32	3.33	33.31	3.0496
00000017	17	57.51	94.03	14.22	354101.78	6491607.32	5.92	4063.16	1.64	50.05	3.8322
00000018	18	45.86	82.54	13.38	357012.49	6492947.44	4.46	5139.26	1.5	69.03	4.0398
00000019	19	45.49	54.26	15.06	355834.69	6491597.36	2.6	5276.47	0.85	83.64	4.5189
00000020	20	32.78	63.84	14.04	359630.84	6492956.18	4.67	4871.91	1.31	71.65	3.3246
00000021	21	32.99	33.67	10.5	357347.51	6490922.91	1.16	4443.38	0.65	82.41	1.5354
00000022	22	27.88	36.32	10.02	359411.67	6490385.44	2.9	3329.48	0.78	57.95	2.8737
00000023	23	22.08	15.79	8.98	360402.25	6491093.58	1.06	2723.09	0.35	62.66	1.6659

Figura 60 - Interface do modelo LASH para compilação de características fisiográficas das sub-bacias

Na guia *Subwatersheds* (Figura 60) são exibidas as variáveis contidas na tabela de atributos das sub-bacias hidrográficas (Figura 34; Figura 49) e as variáveis que são obtidas pelo próprio modelo quando da execução da rotina de compilação automática. Em síntese são computadas, para cada sub-bacia hidrográfica, a área (*Area* – km²), o perímetro (*Perimeter* – km), a posição x (*XPR* – m) e a posição y (*YPR* – m) do centroide, a altitude média (*Avg. Altitude* – m), o desnível (*Delta H* – m), a declividade média (*Avg. Slope* – %), o comprimento do curso d'água principal (*Stream Length* – m), a declividade do curso d'água principal (*Stream Slope* – %) e o tempo de concentração (*TC* – Min). A título de informação, os mapas requeridos pela rotina de compilação automática para processar tais informações são exibidos acima da tabela que as apresenta.

Já na guia *Land Use* (Figura 61) são exibidas, para cada sub-bacia hidrográfica e mês do ano, as variáveis médias mensais atreladas às classes de uso do solo, a saber: índice de área foliar (*Leaf Area Index* – m.m⁻²), altura (*Height* - m), albedo (*Albedo*), (*Surface resistance* s.m⁻¹), profundidade do sistema radicular (*Root Depth* – mm), coeficiente de cultura (*kc*), coeficiente de rugosidade (*Roughness Coef.*), coeficiente de interceptação (*Interception Coef.*) e coeficiente de abstração inicial (*IAC*).

The screenshot shows the 'Verify Maps' window in the LASH software. The 'Soil' tab is selected, and the table below lists variables for 23 sub-basins. The variables include Leaf Area Index, Height, Albedo, Surface Resistance, Root Depth, Kc, Roughness Coef., and Interception Coef.

Cod	Month	Leaf Area Index	Height	Albedo	Surface Resistance	Root Depth	Kc	Roughness Coef.	Interception Coef.	IAC
00000001	1	3.2	0.94	0.12	46.82	376.54	0	0	0	0
00000002	1	2.95	0.87	0.11	43.57	354.63	0	0	0	0
00000003	1	2.87	0.76	0.11	41.22	315.54	0	0	0	0
00000004	1	3.46	1.25	0.13	52.05	447.83	0	0	0	0
00000005	1	2.9	1.3	0.1	41.72	398.91	0	0	0	0
00000006	1	3.26	1.03	0.13	48.79	413.06	0	0	0	0
00000007	1	3.6	1.55	0.12	48.32	452.54	0	0	0	0
00000008	1	3.77	1.25	0.13	50.61	420.03	0	0	0	0
00000009	1	3.37	1.11	0.12	48.53	404.79	0	0	0	0
00000010	1	4.81	5.01	0.12	70.22	1081.03	0	0	0	0
00000011	1	4.32	1.43	0.14	57.21	463.98	0	0	0	0
00000012	1	3.97	1.17	0.14	55.79	448.3	0	0	0	0
00000013	1	2.96	0.88	0.12	44.78	380.42	0	0	0	0
00000014	1	3.87	1.51	0.14	55.09	508.01	0	0	0	0
00000015	1	4.09	1.12	0.14	55.35	425.91	0	0	0	0
00000016	1	4.57	1.51	0.17	66.17	563.84	0	0	0	0
00000017	1	3.68	1.19	0.12	49.96	393.31	0	0	0	0
00000018	1	4.86	2.32	0.15	64.98	637.01	0	0	0	0
00000019	1	3.82	1.41	0.12	50.18	432.9	0	0	0	0
00000020	1	5.21	7.45	0.12	81.05	1514.7	0	0	0	0
00000021	1	3.41	1.24	0.11	44.63	378.43	0	0	0	0
00000022	1	5.06	3.35	0.15	69.09	810.46	0	0	0	0
00000023	1	4.9	5.24	0.13	71.87	1123.77	0	0	0	0

Figura 61 - Interface do modelo LASH para compilação de variáveis atreladas às classes de uso do solo, para cada sub-bacia hidrográfica

As variáveis médias associadas às classes de solo são computadas pela rotina de compilação automática e exibidas na interface ilustrada na Figura 62, na guia *Soil*. Para cada sub-bacia hidrográfica tem-se θ_s (Map of saturation soil moisture content), θ_{PMP} (Map of permanent wilting point soil moisture content), θ_A (Map of current soil moisture content), na unidade de volume de água por volume de solo, e profundidade do solo (Soil Depth), na unidade de milímetros.

The screenshot shows the 'Verify Maps' window in the LASH software. The 'Soil' tab is selected, and the table below lists variables for 23 sub-basins. The variables include Depth (mm), SSWC (m³/m³), Pw/PSWC (m³/m³), Kss (mm/day), PS (dimensionless), Acc (% of Am), Acr (% of Am), AL (% of Am), and At (% of Am).

Cod	Subwatersheds	Depth (mm)	SSWC (m³/m³)	Pw/PSWC (m³/m³)	Kss (mm/day)	PS (dimensionless)	Acc (% of Am)	Acr (% of Am)	AL (% of Am)	At (% of Am)
00000001	1	824.98	0.4323	0.173	0	0	0	0	0	0
00000002	2	1000	0.447	0.185	0	0	0	0	0	0
00000003	3	622.02	0.4152	0.1721	0	0	0	0	0	0
00000004	4	1000	0.447	0.185	0	0	0	0	0	0
00000005	5	500	0.405	0.168	0	0	0	0	0	0
00000006	6	1000	0.447	0.185	0	0	0	0	0	0
00000007	7	500	0.405	0.168	0	0	0	0	0	0
00000008	8	693.44	0.4212	0.1746	0	0	0	0	0	0
00000009	9	1000	0.447	0.185	0	0	0	0	0	0
00000010	10	845.08	0.4226	0.1773	0	0	0	0	0	0
00000011	11	758.61	0.4267	0.1768	0	0	0	0	0	0
00000012	12	1000	0.447	0.185	0	0	0	0	0	0
00000013	13	1000	0.447	0.185	0	0	0	0	0	0
00000014	14	1000	0.447	0.185	0	0	0	0	0	0
00000015	15	605.24	0.4138	0.1716	0	0	0	0	0	0
00000016	16	705.35	0.4222	0.175	0	0	0	0	0	0
00000017	17	552.49	0.4094	0.1698	0	0	0	0	0	0
00000018	18	714.19	0.4159	0.1738	0	0	0	0	0	0
00000019	19	561.94	0.4082	0.1697	0	0	0	0	0	0
00000020	20	1232.81	0.4424	0.1878	0	0	0	0	0	0
00000021	21	1328.84	0.4473	0.1904	0	0	0	0	0	0
00000022	22	1500	0.456	0.195	0	0	0	0	0	0
00000023	23	1500	0.456	0.195	0	0	0	0	0	0

Figura 62 - Interface do modelo LASH para compilação de variáveis atreladas às classes de solo, para cada sub-bacia hidrográfica

Por fim, as guias *Thiessen Polygons Rain Guages* (Figura 63) e *Thiessen Polygons Weather Stations* (Figura 64), exibem, para cada sub-bacia hidrográfica analisada, o código da estação (*Cod Station*) de monitoramento pluviométrico, no primeiro caso, e meteorológico, no segundo, o código do polígono de Thiessen (*Cod Thiessen Polygon*) exibido na legenda do mapa e o percentual da área da sub-bacia (*Percentage*) que recebe influência da estação. Estas informações são necessárias quando da indicação do método dos polígonos de Thiessen para estimativa das variáveis médias pluviométricas e meteorológicas.

Cod Subwatersheds	Cod Station	Cod Thiessen Polygon	Percentage
1	1	0	6.196
1	3152016	1	93.814
2	3152016	1	100
3	1	0	0.094
3	3152016	1	99.916
4	3152016	1	100
5	1	0	20.029
5	3152016	1	79.971
6	3152016	1	100
7	1	0	88.238
7	3152016	1	11.762
8	1	0	34.591
8	3152016	1	65.409
9	3152016	1	100
10	1	0	100
11	1	0	70.64
11	3152016	1	29.36
12	3152016	1	100
13	1	0	12.368
13	3152016	1	87.642
14	3152016	1	100
15	1	0	92.538
15	3152016	1	7.462

Figura 63 - Interface do modelo LASH para compilação de áreas de influência das estações pluviométricas considerando a metodologia dos polígonos de Thiessen

Cod Subwatersheds	Cod Station	Cod Thiessen Polygon	Percentage
1	1	0	99.183
1	2	1	0.817
2	1	0	94.92
2	2	1	5.08
3	1	0	100
4	1	0	90.764
4	2	1	9.236
5	1	0	100
6	1	0	100
7	1	0	100
8	1	0	100
9	1	0	100
10	1	0	100
11	1	0	100
12	1	0	100
13	1	0	100
14	1	0	100
15	1	0	100
16	1	0	100
17	1	0	100
18	1	0	100
19	1	0	100
20	1	0	100

Figura 64 - Interface do modelo LASH para compilação de áreas de influência das estações meteorológicas considerando a metodologia dos polígonos de Thiessen

É notório que o aprimoramento da primeira versão do modelo hidrológico LASH, no que tange ao módulo de integração, traz grandes avanços à sua terceira versão, haja vista que anteriormente não havia nenhuma possibilidade de visualização dos mapas, nem tão pouco uma forma simples e direta de importação de arquivos oriundos do SIG ArcGIS. Estes avanços, de forma direta, subsidiarão a modelagem hidrológica no ambiente do LASH, beneficiando o usuário final em termos de praticidade, tempo de processamento e segurança na importação da base de dados espaciais.

3.5. Módulo de calibração automática

O módulo de calibração automática do modelo LASH possui na sua interface 6 abas, a saber: “*Station to be used*”, “*Runoff*”, “*Intervals*”, “*Methods*”, “*Output files settings*” e “*Run*”, para as quais são atribuídas diferentes funcionalidades.

A primeira aba, “*Station to be used*”, é onde o usuário seleciona as estações pluviométricas, meteorológicas e fluviométrica que serão empregadas na modelagem hidrológica. Além disso, o usuário seleciona nesta interface, entre “vizinho mais próximo”, “média aritmética”, “polígonos de Thiessen” e “inverso do

quadrado da distância”, a metodologia que será empregada para computar a chuva e variáveis meteorológicas médias por sub-bacia hidrográfica.

Na aba “*Runoff*”, cuja interface está apresentada na Figura 65, o usuário indica, entre 19 possibilidades, os parâmetros que deseja calibrar para a bacia em análise. Uma vez selecionados estes parâmetros, o usuário deverá indicar, na interface da aba “*Intervals*”, seus limites inferior e superior.

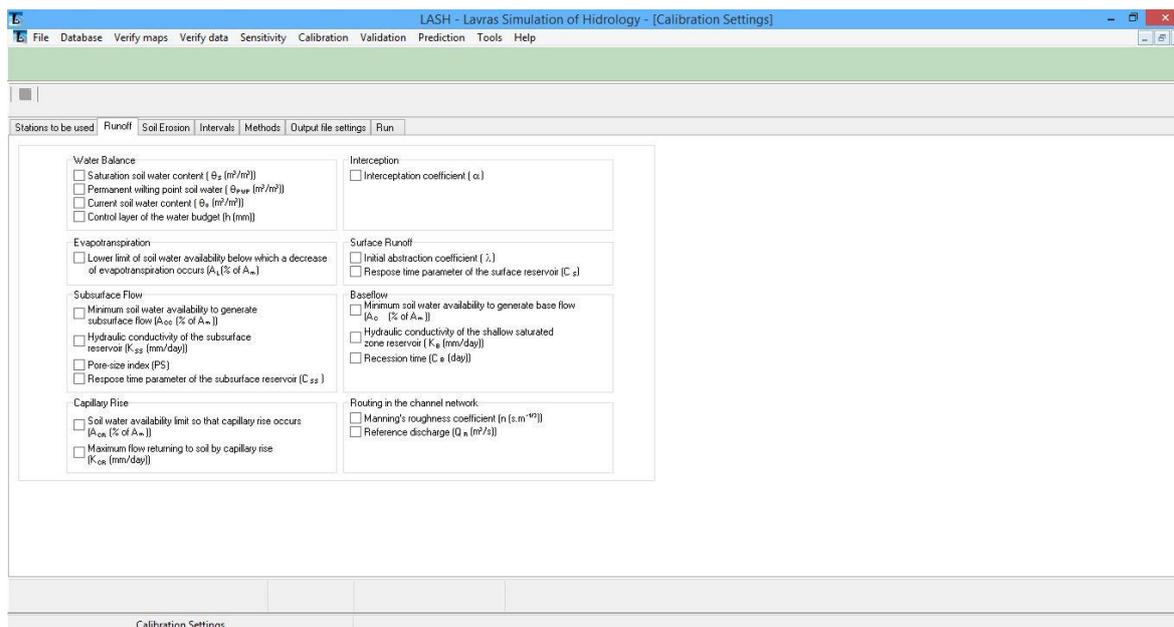


Figura 65 - Interface para seleção dos parâmetros a serem calibrados

A configuração do algoritmo de calibração automática SCE-UA é realizada na interface da aba “*Methods*”, exibida na Figura 66. Existe a necessidade de indicar configurações gerais, como o número de complexos (p) que deseja utilizar na calibração, e os critérios de parada, os quais consistem no número máximo de iterações ou então no alcance de um valor ótimo para a medida estatística.

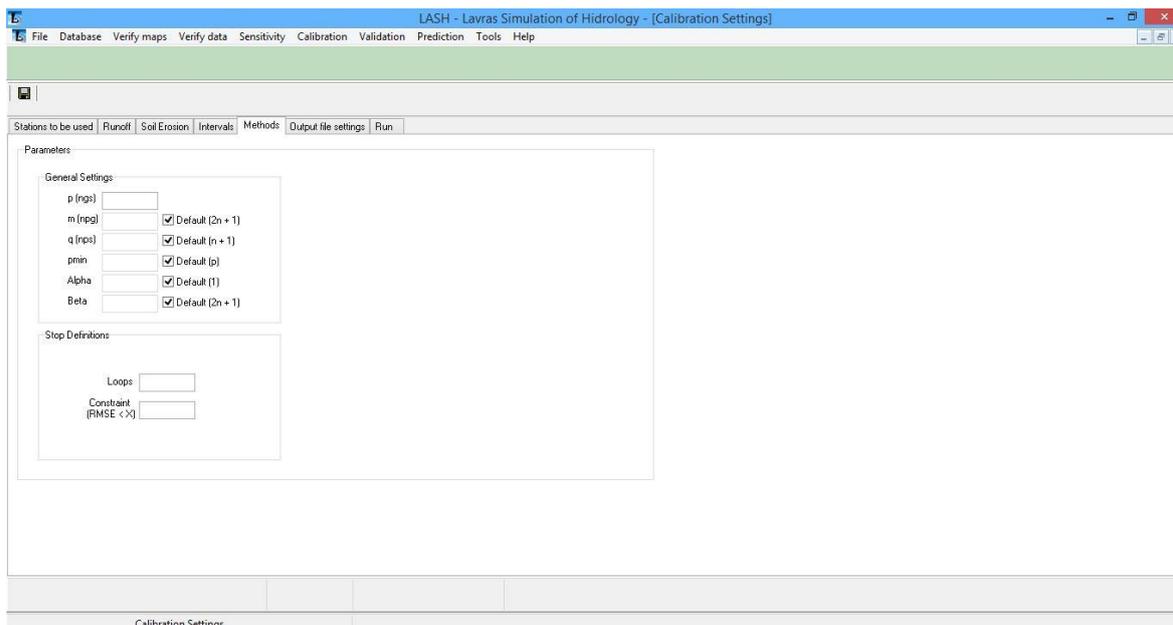


Figura 66 - Interface para configuração do algoritmo de calibração automática SCE-UA

Em “*Output files settings*” o usuário faz a configuração dos resultados conforme sua necessidade, indicando se deseja armazenar todos ou nenhum parâmetro calibrado, bem como se deseja armazenar todas ou apenas a melhor iteração, além de poder optar por armazenar outras variáveis.

Por fim, em “*Run*” (Figura 67), é exibida a interface de configuração da calibração, onde o usuário indica as datas inicial e final que delimitam o período de calibração, onde o usuário indica as datas inicial e final que delimitam o período de calibração, seleciona se irá importar os dados de evapotranspiração de referência diária, se deseja calcular a partir de dados de radiação solar diária ou então a partir de dados de insolação diária, visualiza e pode editar a chuva dos últimos 5 dias, em relação a data inicial da calibração, e pode visualizar os períodos inicial e final de dados observados de chuva, meteorológicos e de vazão.

Stations to be used | Runoff | Soil Erosion | Intervals | Methods | Output file settings | Run

Start: 20/04/2012
End: 24/04/2012

Run iterations
Stop iterations
Create file of iterations
Stop creating files of iterations

Evapotranspiration

Import ETo
 Compute ETo from solar radiation records
 Compute ETo from insolation records

Rainfall
First date: ___/___/___
Last date: ___/___/___

Meteorological
First date: ___/___/___
Last date: ___/___/___

Streamflow
First date: ___/___/___
Last date: ___/___/___

Sediment concentration
First date: ___/___/___
Last date: ___/___/___

P5
5-day antecedent precipitation (mm)

Date	Rainfall

Calibration Settings

Figura 67 - Interface do modelo hidrológico LASH para configuração da etapa de calibração

4 Conclusões

Com base nos resultados apresentados e discutidos neste Capítulo, pôde-se concluir que:

- i. Os aprimoramentos computacionais contemplados na terceira versão do modelo hidrológico LASH se mostraram bastante úteis e eficientes ao que se propõem, tornando a interface do modelo mais amigável e facilitando sua utilização;
- ii. O módulo SYHDA possibilitou um processamento rápido e confiável da base de dados temporal necessária para modelagem no ambiente do LASH, além de permitir analisar os resultados de saída da calibração e da validação do modelo, em termos de estatísticas, curva de permanência e outros indicadores;
- iii. O módulo SYHDA, dadas as proporções tomadas durante seu desenvolvimento, se constituiu em um software passível de ser usado à parte do modelo LASH, contemplando inúmeras ferramentas de análises hidrológicas, incluindo metodologias simples e também sofisticadas;
- iv. O módulo ArcLASH apresentou boa integração com o ambiente do SIG ArcGIS, podendo ser considerado uma ferramenta indispensável frente à eficiência e eficácia no processamento da base de dados espaciais requerida pelo modelo. Esta ferramenta agilizou a modelagem hidrológica no LASH, bem como limitou a inserção de erros por parte do processamento manual de mapas e dados;
- v. O módulo de banco de dados permitiu, de forma eficiente, o cadastramento e armazenamento de informações e dados referentes às estações de monitoramento pluviométrico, meteorológico e fluviométrico, bem como de solo e de uso do solo, trazendo agilidade ao usuário do modelo no que concerne à necessidade de entrada de informações;

- vi. O módulo de integração mostrou grande utilidade, sendo indispensável para uma eficiente utilização dos módulos SYHDA e ArcLASH, uma vez que permite importar para o ambiente do modelo as informações por eles exportadas, e além disso, permite ao usuário visualizar os mapas diretamente no ambiente do LASH, o que é outro grande diferencial com relação à segunda versão;
- vii. O módulo de calibração automática consistiu em uma interface bastante simples, de fácil compreensão, apesar de contemplar um algoritmo bastante complexo;

Capítulo 2 – Aplicabilidade da terceira versão do modelo Lavras Simulation of Hydrology (LASH): estudo de caso nas bacias hidrográficas dos arroios Pelotas e Fragata, extremo sul do Brasil

1 Introdução

Um modelo hidrológico objetiva descrever quantitativamente os componentes do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica, podendo ser empregado para inúmeras finalidades, como previsões de inundação em tempo real, estimativa de frequência de vazões de cheia, dimensionamentos hidrológicos de estruturas hidráulicas, análise de vazões de referência e avaliação do impacto do clima e de alterações no uso do solo, sendo uma ferramenta cada vez mais empregada na gestão de recursos hídricos para tomada de decisões (BESKOW *et al.*, 2016)

Os modelos hidrológicos necessitam de dados de entrada, tanto espaciais quanto temporais, comumente difíceis de serem obtidos, podendo representar um custo bastante elevado para aquisição. Neste sentido, da exigência de informações mais detalhadas a respeito da área de estudo, destacam-se os modelos SWAT (ARNOLD *et al.*, 1998), WEPP (FLANAGAN; NEARING, 1995) e LISEM (DE ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996).

De forma alternativa àqueles acima mencionados, pode-se empregar modelos que demandem uma base de dados compatível com a realidade encontrada na escala de bacia hidrográfica. Contudo, um modelo hidrológico conceitual precisa ser calibrado e validado para que possa ser empregado de forma adequada (WHITE; CHAUBEY, 2005).

Na maioria dos países em desenvolvimento, existe uma grande escassez de informações, de domínio público, que subsidiem a modelagem hidrológica em escala de bacia hidrográfica; o monitoramento hidrológico que vem sendo realizado no Brasil, por exemplo, contempla predominantemente grandes bacias hidrográficas, geralmente com o propósito de geração de energia elétrica (BESKOW *et al.*, 2009b). De forma complementar, bacias hidrográficas experimentais, geralmente de pequeno porte, vem sendo monitoradas por instituições de ensino e pesquisa, públicas e privadas, no entanto, as informações

derivadas desse monitoramento não se encontram facilmente disponibilizadas, na maioria dos casos.

Visando superar as limitações intrínsecas à disponibilidade de informações espaço-temporais para modelagem hidrológica, modelos que necessitem de uma quantidade menor de informações, e ao mesmo tempo fáceis de serem obtidas, vêm sendo cada vez mais desenvolvidos. Dentre estes modelos, destaca-se o LASH, cuja primeira versão foi desenvolvida por Viola (2008), a segunda, por Beskow (2009), e a terceira foi desenvolvida e apresentada nesta Dissertação (Capítulo 1).

O modelo LASH, na sua terceira versão, é um modelo hidrológico chuva-vazão classificado como de longo termo, semiconceitual e semidistribuído, com análise do balanço hídrico em sub-bacias hidrográficas. Desde sua concepção, em 2008, foi desenvolvido para estimar os principais componentes do ciclo hidrológico em bacias hidrográficas onde existe carência de informações, e vem sendo aplicado com sucesso em algumas regiões do Brasil (Figura 68).

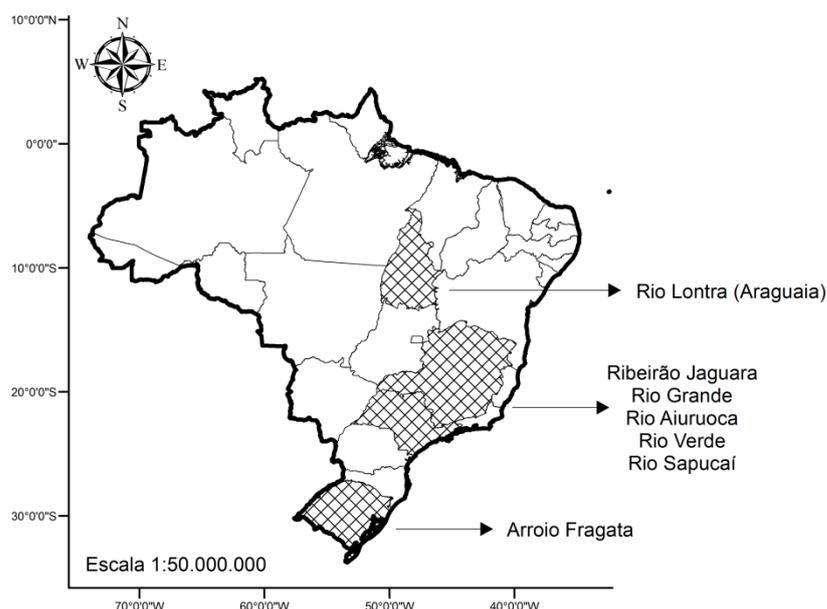


Figura 68 - Estados brasileiros e cursos d'água onde o modelo LASH já foi empregado com sucesso para modelagem e simulação hidrológica em bacias hidrográficas com carência de dados

A terceira versão do modelo LASH contempla inúmeros aprimoramentos computacionais, desde o processamento da base de dados temporal e espacial – idealização e desenvolvimento do SYHDA e do ArcLASH, respectivamente – até o desenvolvimento de uma interface substancialmente mais “amigável” quando

comparada à versão anterior, incluindo diversas funcionalidades que objetivam facilitar a modelagem hidrológica em termos de entrada de dados, processamento e análise dos resultados de saída. Além disso, a rotina hidrológica e o módulo de calibração automática com o algoritmo SCE-UA foram totalmente adaptados visando permitir que esta versão tenha uma abordagem semidistribuída por sub-bacias hidrográficas.

Neste contexto, todos os aprimoramentos, para os quais maiores detalhes podem ser consultados no Capítulo 1, necessitam ser avaliados na prática; o módulo de calibração automática empregando o algoritmo SCE-UA, por exemplo, nunca foi empregado para calibração de parâmetros na modelagem com discretização espacial por sub-bacias hidrográficas junto ao modelo LASH.

Frente ao exposto, este Capítulo tem por objetivo apresentar uma avaliação do desempenho da terceira versão do modelo LASH frente à modelagem hidrológica nas bacias hidrográficas do Arroio Pelotas e do Arroio Fragata, localizadas no sul do Rio Grande do Sul.

2 Material e Métodos

2.1. Bacias hidrográficas analisadas

2.1.1. Contextualização e relevância da área de estudo

Exercendo um papel ímpar para o desenvolvimento econômico de Pelotas, município que possui 328.275 habitantes (IBGE, 2010), o arroio Pelotas, junto à tomada d'água da Estação de Tratamento de Água (ETA) Sinotti, tem capacidade de recalque de 36 milhões de litros por dia (SANEP, 2015), sendo considerado o arroio que mais fornece água bruta ao Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas (SANEP). O abastecimento do município é complementado pelo arroio Santa Bárbara, o qual deságua na Barragem Santa Bárbara, que por sua vez alimenta a ETA Santa Bárbara, com capacidade estimada em 40 milhões de litros por dia, e pelo arroio Moreira, que é um dos principais tributários do arroio Fragata, através da ETA da Represa Moreira, com capacidade de adução de 7 milhões de litros por dia, segundo SANEP (2015).

Além de ser extremamente importante para o abastecimento público, o arroio Pelotas tem um valor histórico imensurável para o Rio Grande do Sul, tendo sido declarado patrimônio cultural do Estado pela Lei nº 11.895 de 2 de março de 2003. Foram às margens do arroio Pelotas que se desenvolveram as charqueadas, propriedades em que se produzia carne bovina salgada e seca ao sol (charque), trazendo prosperidade à região e dando origem ao município de Pelotas.

Do ponto de vista hidrológico, os arroios Pelotas e Fragata são importantes afluentes do canal São Gonçalo, o qual é uma importante via navegável, de 76 km de extensão, que liga a laguna dos Patos à lagoa Mirim, banhada por águas brasileiras e uruguaias. O São Gonçalo, dentre os usos múltiplos que contempla, abastece o município de Rio Grande desde a década de 80 e virá a abastecer o município de Pelotas, de acordo com projeto da Prefeitura Municipal.

As bacias hidrográficas dos arroios Pelotas (BHAP) e Fragata (Bhaf), considerando seus exutórios no Canal São Gonçalo, abrangem os municípios de

Pelotas, Capão do Leão, Morro Redondo, Arroio do Padre e Canguçu, incluindo zonas rurais, nas regiões mais altas, e zonas urbanas, na planície.

Pela Lei nº 10.350 de 1994, que regulamentou o artigo 171 da Constituição Estadual, o Rio Grande do Sul possui três regiões hidrográficas: rio Uruguai, Guaíba e Litoral, sendo que cada região foi dividida em bacias hidrográficas, totalizando 25. Neste contexto, a BHAP e a BHAF encontram-se na região do Litoral, na bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo.

Diante da relevância desses corpos hídricos, o presente estudo foi conduzido na BHAP e na BHAF, como estudos de caso para aplicação versão do modelo LASH. Devido à disponibilidade de dados hidrológicos monitorados pela ANA nas seções de controle denominadas “Ponte Cordeiro de Farias” e “Passo dos Carros”, a BHAP e a BHAF foram delimitadas à montante dessas seções, caracterizando assim a BHAP-PCF (aproximadamente 368 km²) e a BHAF-PC (aproximadamente 132 km²), respectivamente, cuja localização espacial pode ser visualizada na Figura 69.

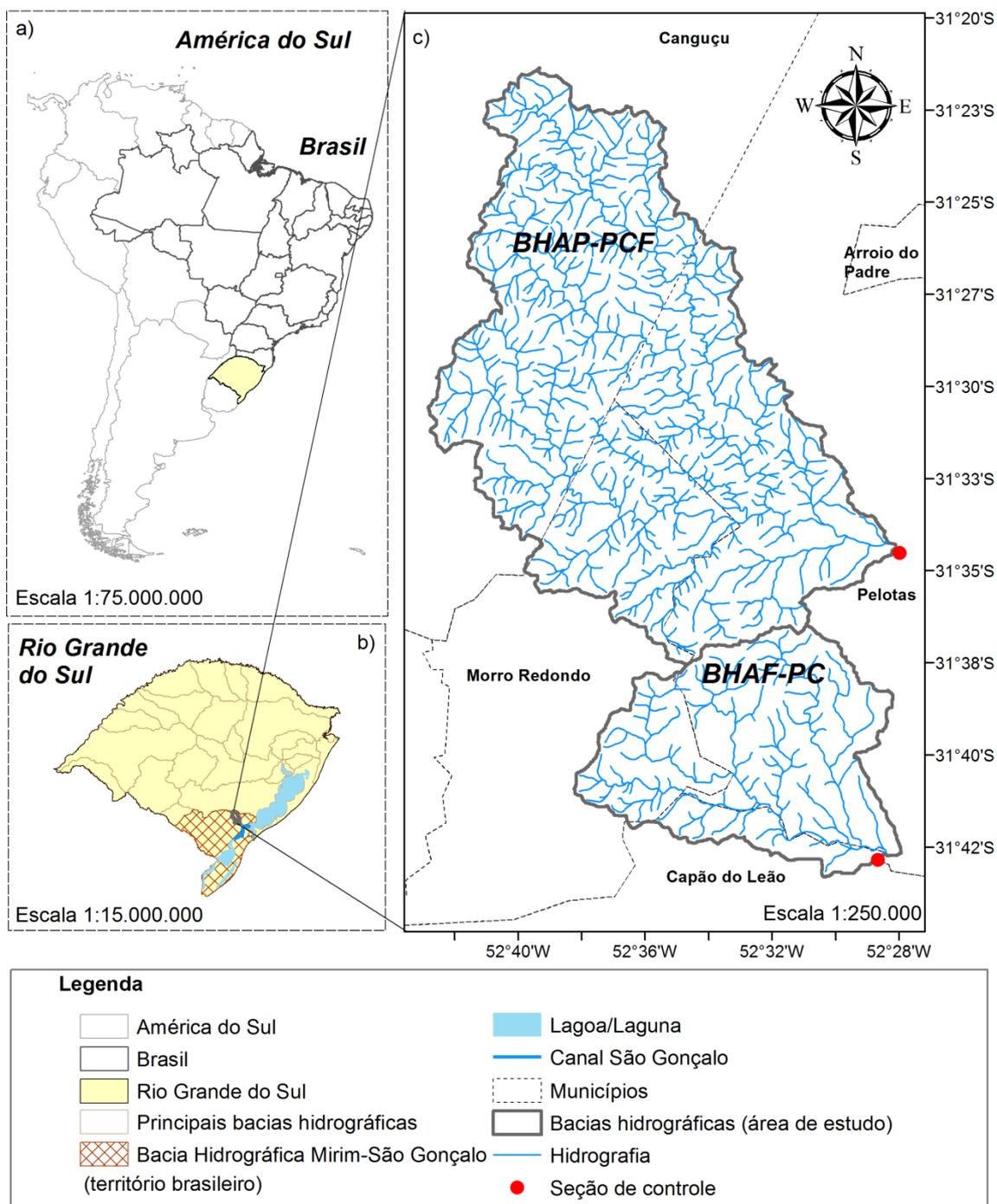


Figura 69 - Localização das áreas de estudo no Brasil (a), no Rio Grande do Sul (b) e na região (c)

Assumindo que os registros históricos do período de 1971 a 2000, observados pela Estação Agroclimatológica de Pelotas (EMBRAPA, 2015), localizada no município de Capão do Leão, sejam representativos da área de estudo, o clima da região pode ser descrito pelas variáveis meteorológicas médias apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis meteorológicas médias observadas entre 1971 e 2000 na Estação Agroclimatológica de Pelotas, localizada no município de Capão do Leão

Variável	Valor observado
Temperatura média anual	17,8°C
Temperatura média das mínimas	13,8°C
Temperatura mínima absoluta	-3°C
Temperatura média das máximas	22,9°C
Temperatura máxima absoluta	39,6°C
Precipitação pluviométrica média anual	1366,9mm
Precipitação máxima em 24 horas	188,2mm
Número médio de dias de precipitação	124,1
Umidade relativa média anual	80,70%
Evaporação média anual no Tanque Classe "A"	1529,1mm
Evaporação média anual no evaporímetro de Piche	1323,6mm
Evapotranspiração potencial média anual	1103,1mm
Radiação solar global média anual	344,8cal.cm ⁻² .dia ⁻¹
Nebulosidade média anual	5,9
Pressão barométrica média anual	1015,1mb
Velocidade média anual do vento	3,5m.s ⁻¹
Direção predominante do vento	E
Velocidade máxima do vento	30 m.s ⁻¹
Direção do vento na velocidade máxima	NE
Número de dias de geada	23,9
Número de dias de granizo	1,6
Número de dias de orvalho	103,2
Número de dias de nevoeiro	64,2

Fonte: EMBRAPA (2015)

De acordo com a classificação climática de Köppen para o Brasil, em estudo realizado por Sparovek, Van Lier e Dourado Neto (2007), o clima na região sul do país é do tipo Cf, caracterizado por ser temperado úmido sem estação seca. Especificamente para o estado do Rio Grande do Sul, Kuinchtner e Buriol (2001), em estudo empregando classificação de Köppen e Thornthwaite, indicaram clima do tipo Cfa e Cfb, enquadrando a região da BHAP e da BHAF na primeira classe, para a qual há ocorrência de clima subtropical chuvoso, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C.

2.1.2. Base de dados hidrológicos e climáticos

Com relação à disponibilidade de dados hidrológicos e meteorológicos, existem poucos postos de monitoramento consolidados na área de estudo, especialmente no tocante a vazões, como ressaltado anteriormente.

No que tange a dados meteorológicos, existe monitoramento por parte da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), através do Centro de Pesquisa Agropecuária Clima Temperado (CPACT), e por parte do INMET. A EMBRAPA-CPACT conta com duas estações, denominadas “Sede” e “Cascata”, estando a primeira instalada junto à sua sede e a segunda junto à Estação Experimental Cascata. Por sua vez, o INMET tem uma estação meteorológica (Estação Agroclimatológica de Pelotas ou simplesmente Pelotas) instalada junto à Estação Experimental Terras Baixas da EMBRAPA-CPACT, no Campus Capão do Leão, da Universidade Federal de Pelotas.

Destas estações meteorológicas foram obtidas as séries de temperatura mínima, temperatura máxima, velocidade do vento, umidade relativa e insolação, considerando o intervalo de tempo diário. Os dados foram obtidos junto à EMBRAPA-CPACT e ao BDMEP, no caso da estação do INMET.

Além das variáveis supracitadas, junto às estações meteorológicas também foram obtidos dados de precipitação pluviométrica diária. A rede de postos de monitoramento de chuva foi complementada pelas estações denominadas “Ponte Cordeiro de Farias”, instalada próximo à seção de controle da BHAP-PCF, “Canguçu”, localizada no município de Canguçu, onde encontra-se a nascente do arroio Pelotas, e “Granja São Pedro”, instalada próximo à Laguna dos Patos, distante cerca de 30km da BHAP-PCF e da BHAF-PC, estando estas sobre responsabilidade da ANA e operação por parte da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

Os dados diários das estações pluviométricas de responsabilidade da ANA foram obtidos na plataforma HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas (ANA, 2015), assim como os dados fluviométricos diários observados nas estações “Ponte Cordeiro de Farias” (BHAP-PCF) e “Passo dos Carros” (BHAF-PC).

Em síntese, informações referentes às estações de monitoramento meteorológico, pluviométrico e fluviométrico, empregadas no estabelecimento da base de dados temporais, podem ser visualizadas na Tabela 3, e a localização destas em relação à área de estudo, na Figura 70. Destaca-se que foi adotado como padrão, para designação da estação de monitoramento, o código a ela vinculado (Tabela 3).

Tabela 3 - Caracterização das estações de monitoramento meteorológico, pluviométrico e fluviométrico empregadas neste estudo

Nome	Responsável	Código	Variável	Latitude	Longitude	Altitude (DEM-HC)
Sede	EMBRAPA-CPACT	00001	Meteorológica Pluviométrica	-31,70	-52,40	20
Cascata	EMBRAPA-CPACT	00002	Meteorológica Pluviométrica	-31,47	-52,51	169
Estação Agrometeorológica de Pelotas	INMET EMBRAPA-CPACT UFPEL	83895	Meteorológica Pluviométrica	-31,78	-52,41	14
Ponte Cordeiro de Farias	ANA	3152016	Pluviométrica	-31,57	-52,46	40
Canguçu	ANA	3152003	Pluviométrica	-31,4	-52,67	382
Granja São Pedro	ANA	3152008	Pluviométrica	-31,67	-52,18	12
Ponte Cordeiro de Farias	ANA	88850000	Fluviométrica	-31,57	-52,46	40
Passo dos Carros	ANA	88750000	Fluviométrica	-31,71	-52,48	20

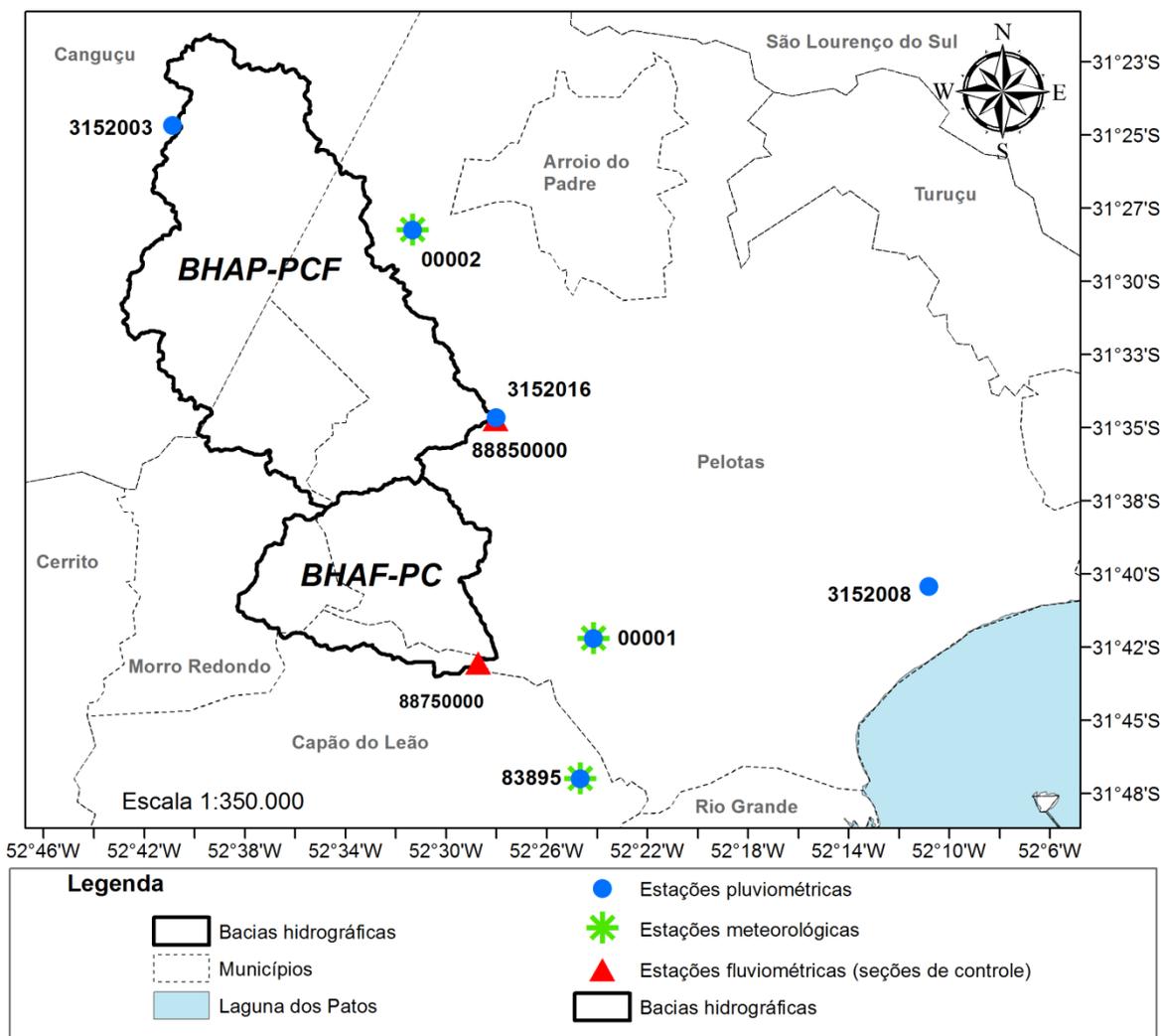


Figura 70 - Localização as estações empregadas em relação à área de estudo

Os arquivos brutos, obtidos junto ao HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas, contendo dados de precipitação pluviométrica e de vazão, e junto ao BDMEP, contendo dados de precipitação pluviométrica, foram organizados com o auxílio da ferramenta SYHDA, gerando séries históricas contínuas de dados diários no formato *.xls.

Os períodos de registro de dados das estações empregadas neste estudo são bastante divergentes, como no caso da 83895, que começou a operar 01/01/1926, e da 3152008, que data de 1966. Haja vista a disparidade entre os períodos com dados, e levando em consideração a existência de falhas nas séries, foi definido um período em comum compreendido entre 01/01/1994 e 31/12/2008.

2.1.3. Estabelecimento da base de dados espaciais

No que concerne à base de dados espacial requerida pelo modelo LASH, esta foi conduzida através da ferramenta ArcLASH, tendo sido necessário elaborar os mapas de entrada: MDE, classes de solo, classes de uso do solo, localização das estações de monitoramento pluviométrico e meteorológico e localização das seções de controle.

A informação primordial para estudos hidrológicos consiste do relevo, o qual permite derivar informações essenciais para alimentar modelos de simulação hidrológica. Com relação ao relevo, foram empregados os planos de informação referentes às curvas de nível, pontos cotados e hidrografia vetorizada, extraídos da base cartográfica de Hasenack e Weber (2010), contemplando todo o Rio Grande do Sul, na escala de 1:50.000.

Tais planos de informação fundamentaram o MDE (Figura 71), o qual foi elaborado no ambiente do SIG ArcGIS, empregando a ferramenta *Topo to raster* para interpolação de dados vetoriais. Dado o esforço computacional requerido quando do processamento do MDE para uma grande área, como a do Rio Grande do Sul, optou-se por estabelecer uma máscara sobre a região de estudo, gerando o referido mapa apenas para extensão definida. A resolução espacial trabalhada foi de 30m. Como as demais informações dependentes do relevo são processadas pelo ArcLASH, não foi necessário corrigir as depressões espúrias do terreno, pois o primeiro passo da ferramenta é gerar o MDE-HC.

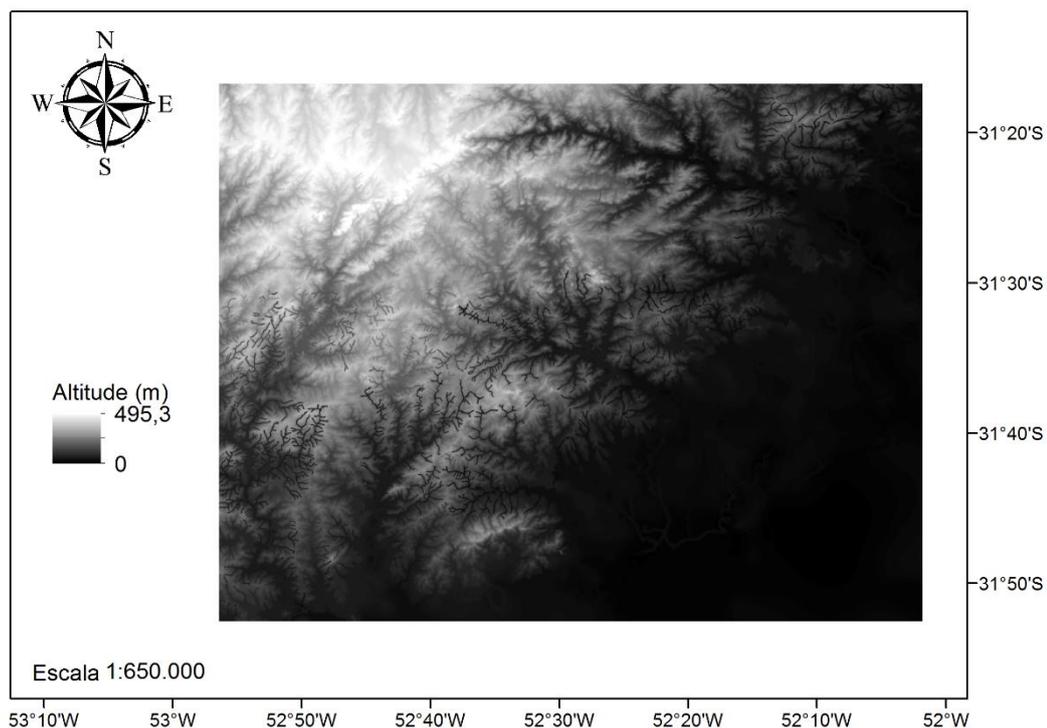


Figura 71 – Modelo Digital de Elevação (MDE) empregado para processar as bases de dados espaciais da BHAP e da BHAF através do ArcLASH

O mapa de solos empregado (Figura 72) foi obtido a partir do Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1973), o qual identificou 3 grandes grupos de solos (Solos de Planalto, Solos da Campanha e da Serra do Sudeste e Solos da Depressão Central e Litoral), subdividindo-os em 111 unidades de mapeamento, para as quais analisaram-se características físicas, químicas e potencial de uso.

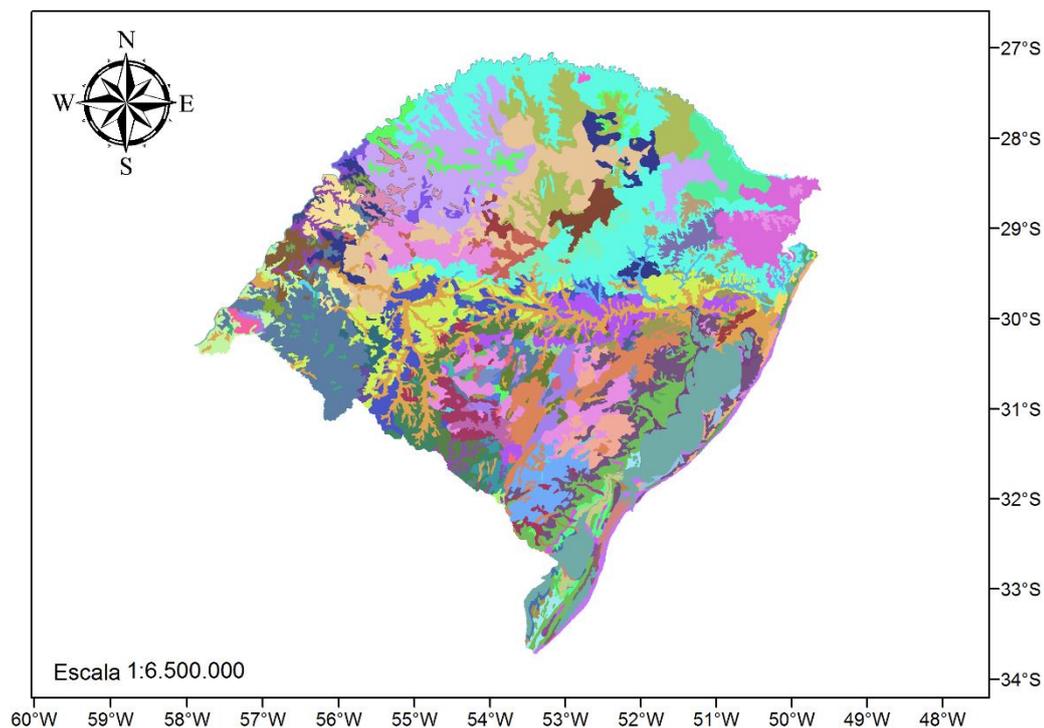


Figura 72 - Mapa de solos empregado para processar as bases de dados espaciais da BHAP e da BHAF através do ArcLASH

No que diz respeito ao mapa de classes de uso do solo (Figura 73), foram empregadas imagens do satélite Landsat disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As cenas 221_81 e 222_82 foram interpretadas utilizando classificação supervisionada, através do método da Máxima Verossimilhança, tomando-se como base 200 pontos de uso do solo conhecidos, os quais foram obtidos através de caminhamento com Sistema de Posicionamento Global (GPS). Para tal intento, empregou-se o software Environment for Visualizing Images (ENVI), seguindo recomendações de Perrotta (2005), gerando o referido mapa para um *buffer* de extrapolação da área de estudo.

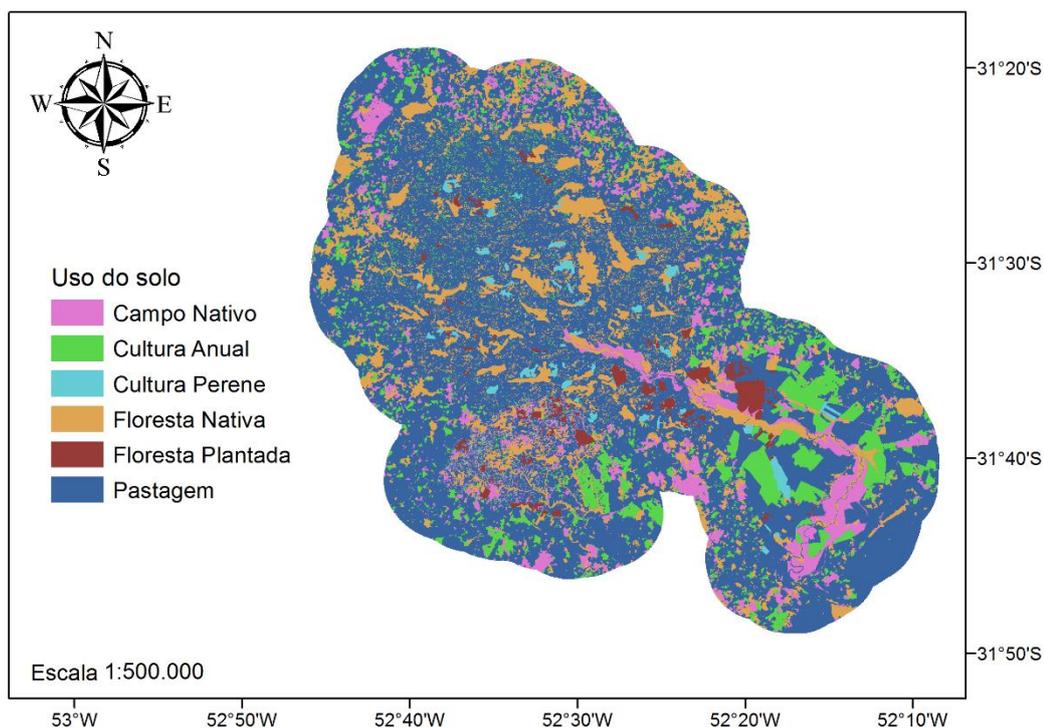


Figura 73 - Mapa de uso do solo empregado para processar as bases de dados espaciais da BHAP e da BHAF através do ArcLASH

Já os mapas de localização das estações pluviométricas (Figura 74) e meteorológicas (Figura 75), bem como da seção de controle da BHAP-PCF (Figura 76) e da BHAF-PC (Figura 77) foram desenvolvidos no ambiente do SIG ArcGIS, considerando as coordenadas geográficas disponibilizadas pelos órgãos responsáveis pelo monitoramento (Tabela 3).

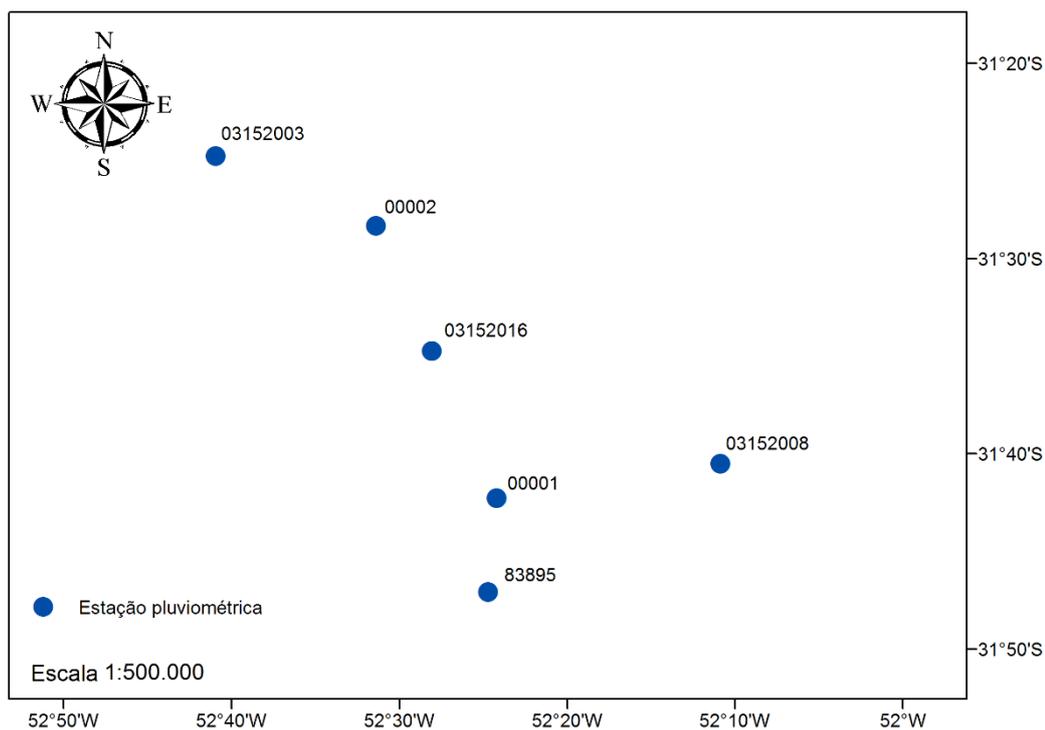


Figura 74 - Mapa de estações pluviométricas empregado para processar as bases de dados espaciais da BHAP e da BHAF através do ArcLASH

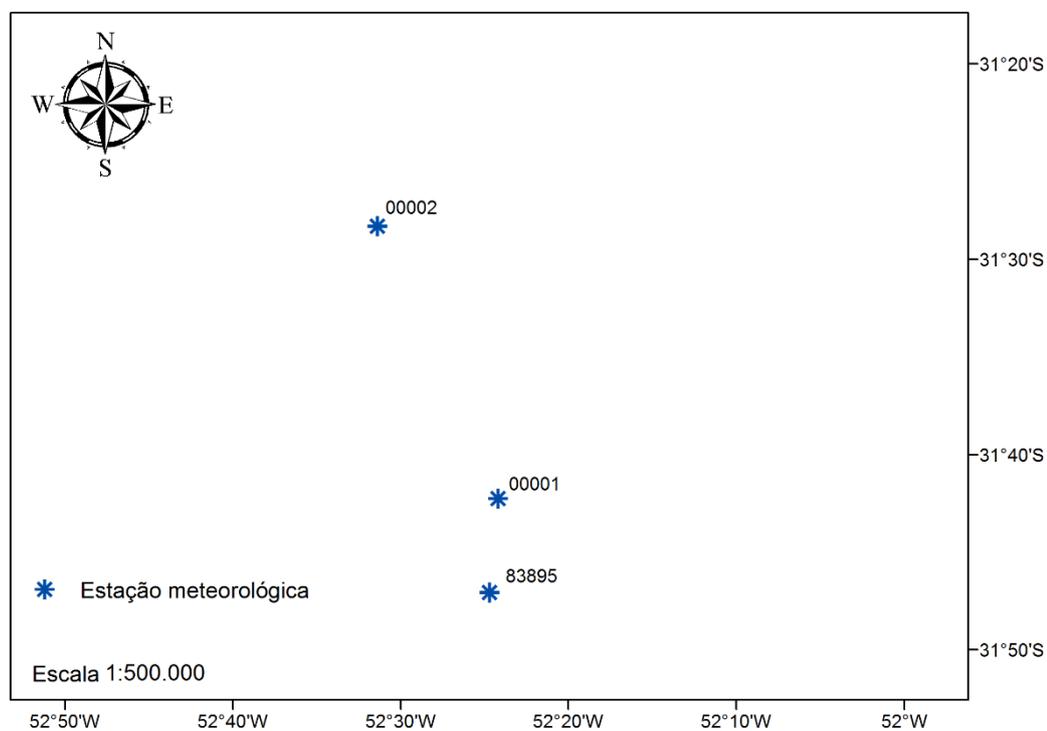


Figura 75 - Mapa de estações meteorológicas empregado para processar as bases de dados espaciais da BHAP e da BHAF

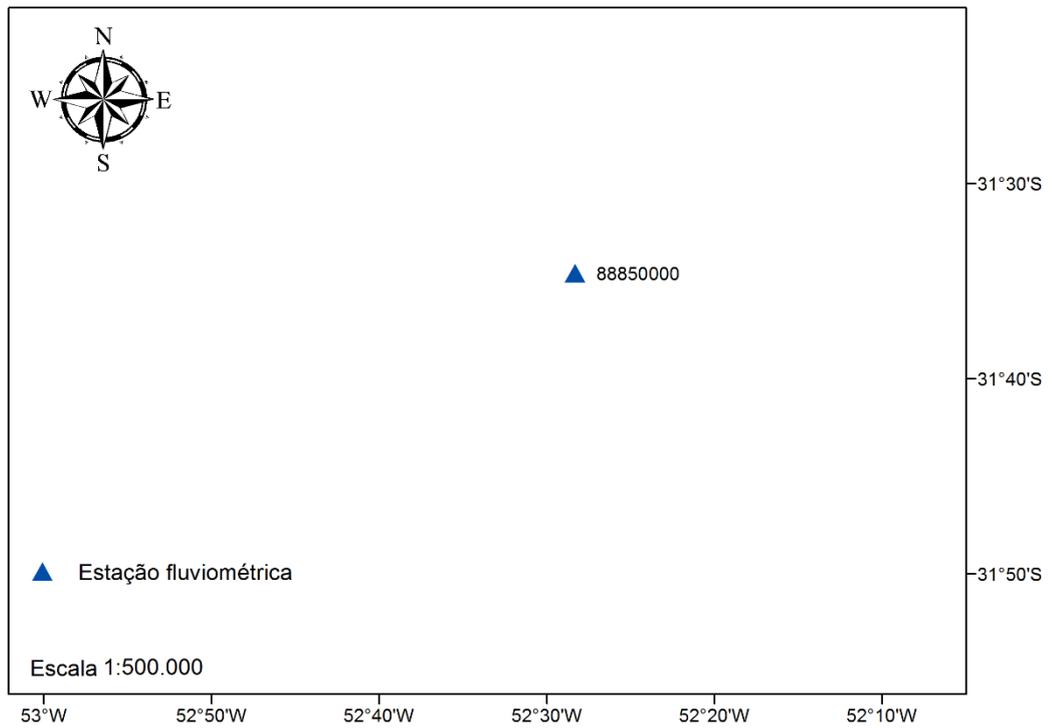


Figura 76 - Mapa da seção de controle empregada para processar as bases de dados espaciais da BHAP-PCF

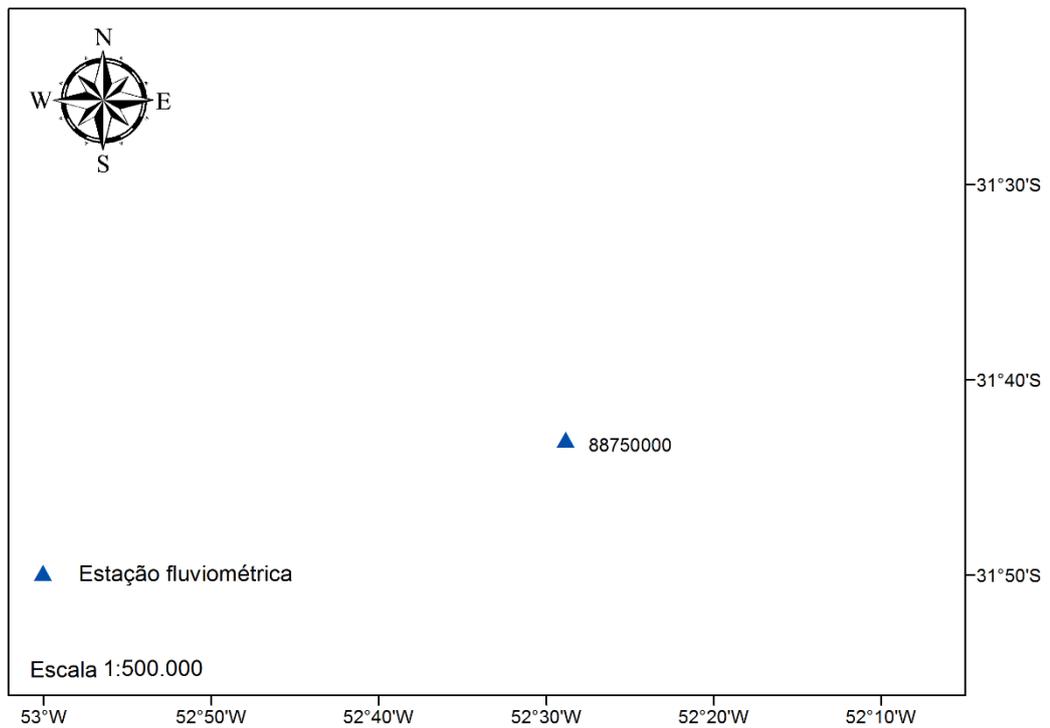


Figura 77 - Mapa da seção de controle empregada para processar as bases de dados espaciais da BHAF-PC

2.1.3.1. Características fisiográficas

Todos os mapas e demais informações derivadas espacialmente, necessários à modelagem hidrológica no ambiente no modelo LASH, foram processados através da ferramenta ArcLASH, como mencionado anteriormente. Contudo, faz-se necessário, para descrição da área de estudo, apresentar de forma mais detalhada algumas variáveis.

Na Figura 78 pode-se observar o MDE-HC, gerado pelo ArcLASH, extraído e derivado do MDE apresentado na Figura 71, para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC. Na região de cabeceira da BHAP-PCF ocorrem as altitudes mais elevadas, culminando num forte gradiente de variação entre o ponto mais alto (495m) e o exutório da bacia (40m). Grande parte da BHAF-PC ocorrem altitudes mais baixas, identificando-se uma pequena parcela, na região de cabeceira, com altitude máxima de 348m. A seção de controle da BHAF-PC encontra-se a 20 m acima do nível do mar.

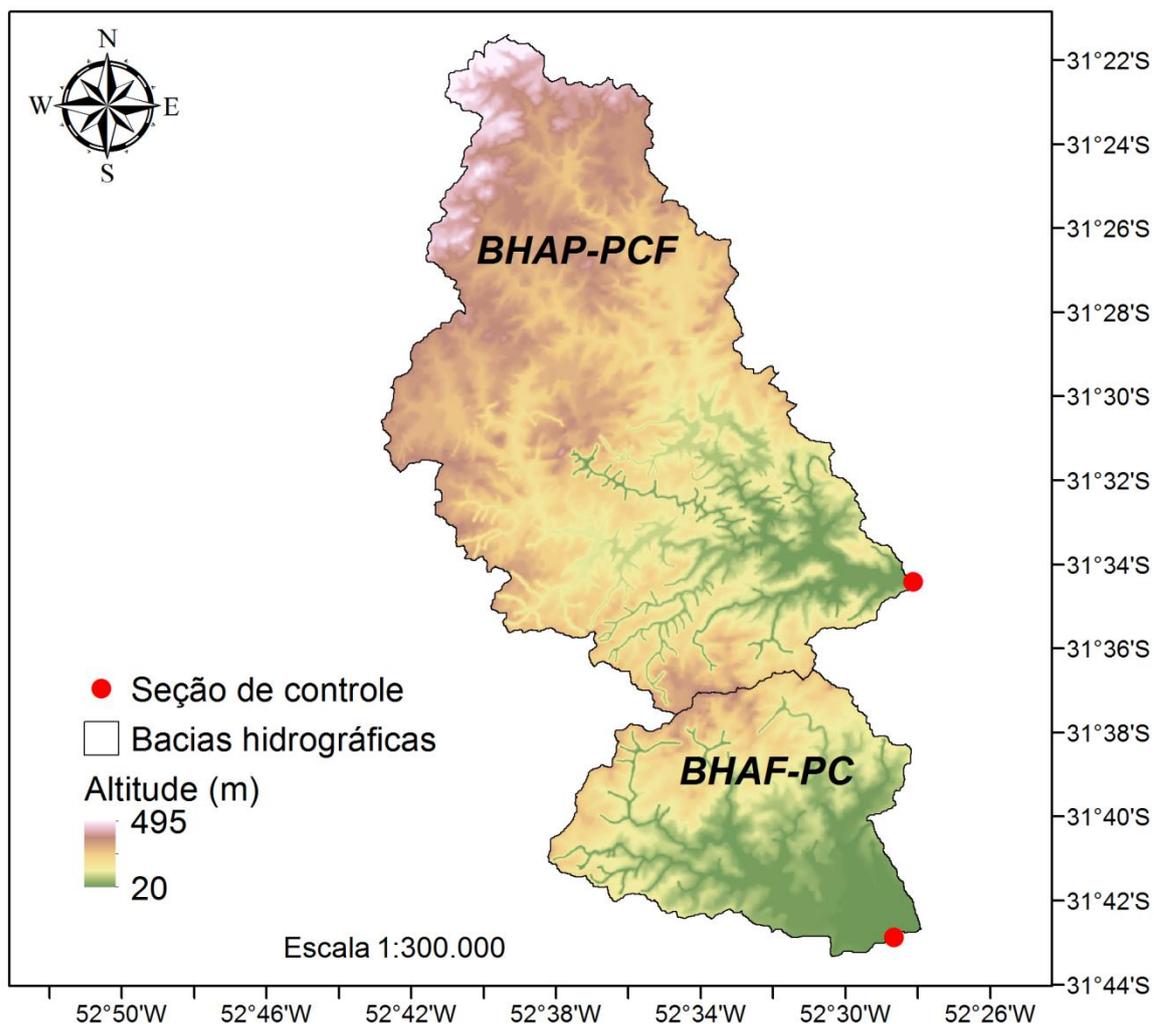


Figura 78 - Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDE-HC) para a área de estudo

Do MDE-HC derivou-se o mapa de declividade do terreno, apresentado na Figura 79 para as duas bacias hidrográficas. Embora a região de cabeceira da BHAP-PCF apresente altitudes mais elevadas que a região da seção de controle, a declividade apresenta maior variação quando se observa a região do médio e baixo arroio Pelotas, estando a declividade média dessa bacia na ordem de 16%. O contrário ocorre no caso da BHAF-PC, onde se verifica declividades mais acentuadas na região de cabeceira e uma notória planície no terço inferior da bacia. A declividade média da BHAF-PC é de cerca de 14%.

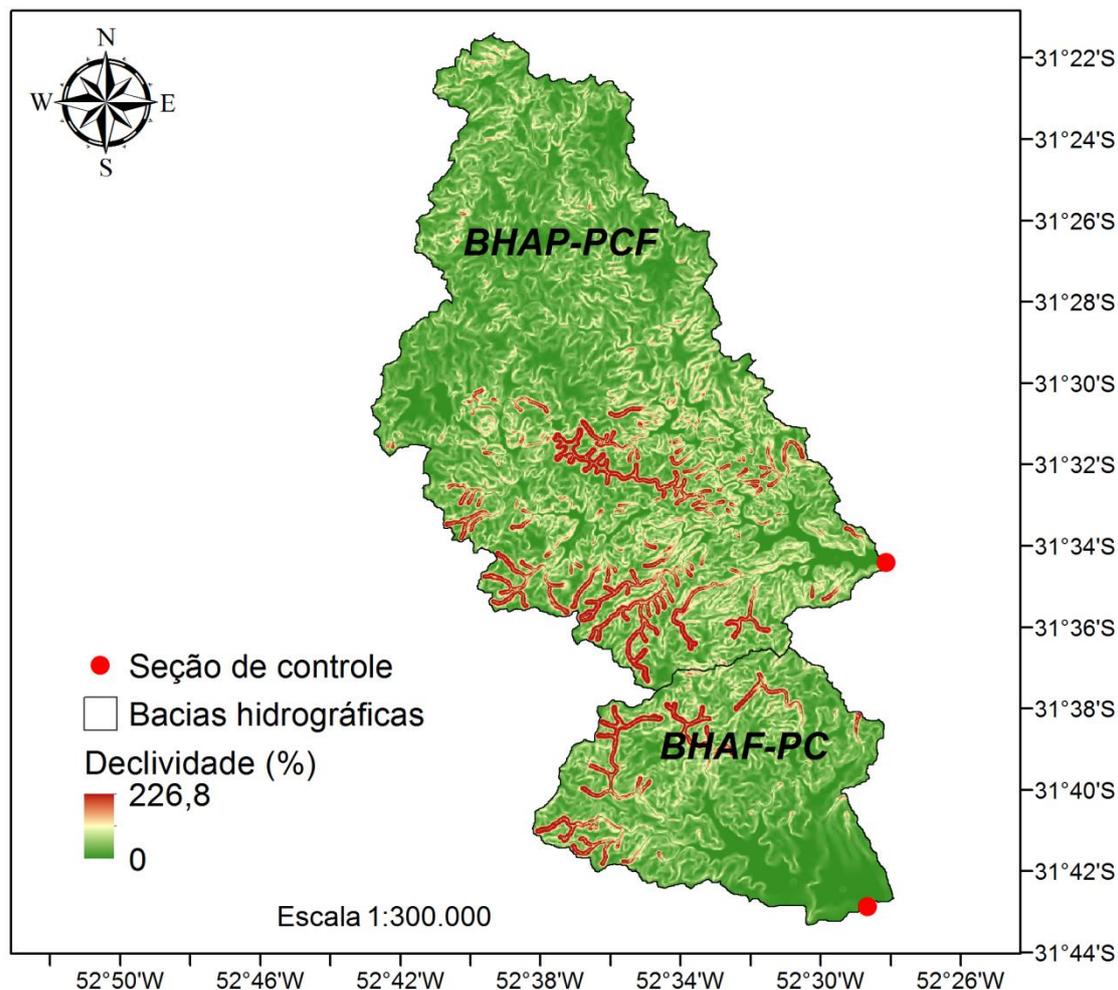


Figura 79 - Mapa de declividade do terreno para a área de estudo

No que tange às sub-bacias hidrográficas, que são as unidades de análise hidrológica da terceira versão do modelo LASH, estas foram derivadas do relevo (Figura 78) quando do processamento automático da base de dados espaciais no ArcLASH, tendo sido indicado os seguintes limiares de rede de drenagem: 4.500 células para a BHAP-PCF e de 2.800 células para a BHAF-PC.

Estes limiares correspondem ao número mínimo de células que deveriam acumular fluxo de escoamento à montante de uma célula analisada para caracterizar esta célula como parte integrante da rede de drenagem numérica. Desta forma, para a BHAP-PCF uma célula só foi considerada rede de drenagem se uma área igual ou superior a 4,05 km² escoasse em direção a ela, enquanto que para a BHAF-PC, esta área deveria ser de 2,52 km². Uma vez definida esta rede de drenagem, uma sub-bacia hidrográfica somente é delimitada com a confluência de dois cursos d'água.

As análises realizadas neste estudo foram conduzidas na BHAP-PCF e na BHAF-PC com base nas sub-bacias hidrográficas resultantes da rede de drenagem definidas pelos referidos limiaries, sendo que no primeiro caso foram identificadas 43 confluências e, no segundo caso, 23, conforme apresentado na Figura 80.

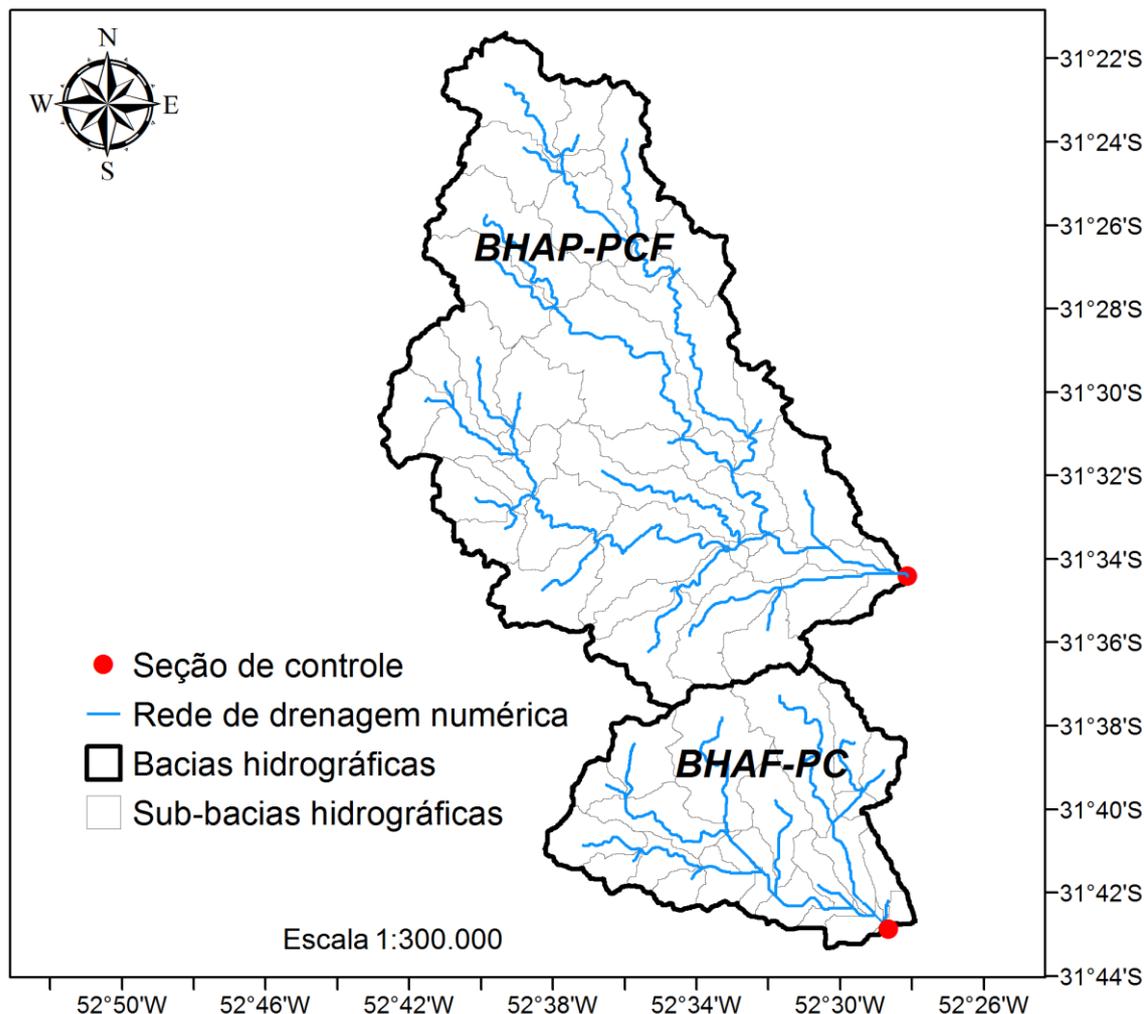


Figura 80 - Mapa de sub-bacias hidrográficas e rede de drenagem numérica para a área de estudo

2.1.3.2. Base de dados de solos

O mapa de classes de solo elaborado a partir do Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1973), extraído para a área de estudo (Figura 81), indica que há ocorrência de cinco classes: LUVISSOLO HIPOCRÔMICO Órtico típico associado à NEOSSOLO

LITÓLICO Distrófico, NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico, LUVISSOLO HIPOCRÔMICO Órtico típico associado à ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, e ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico.

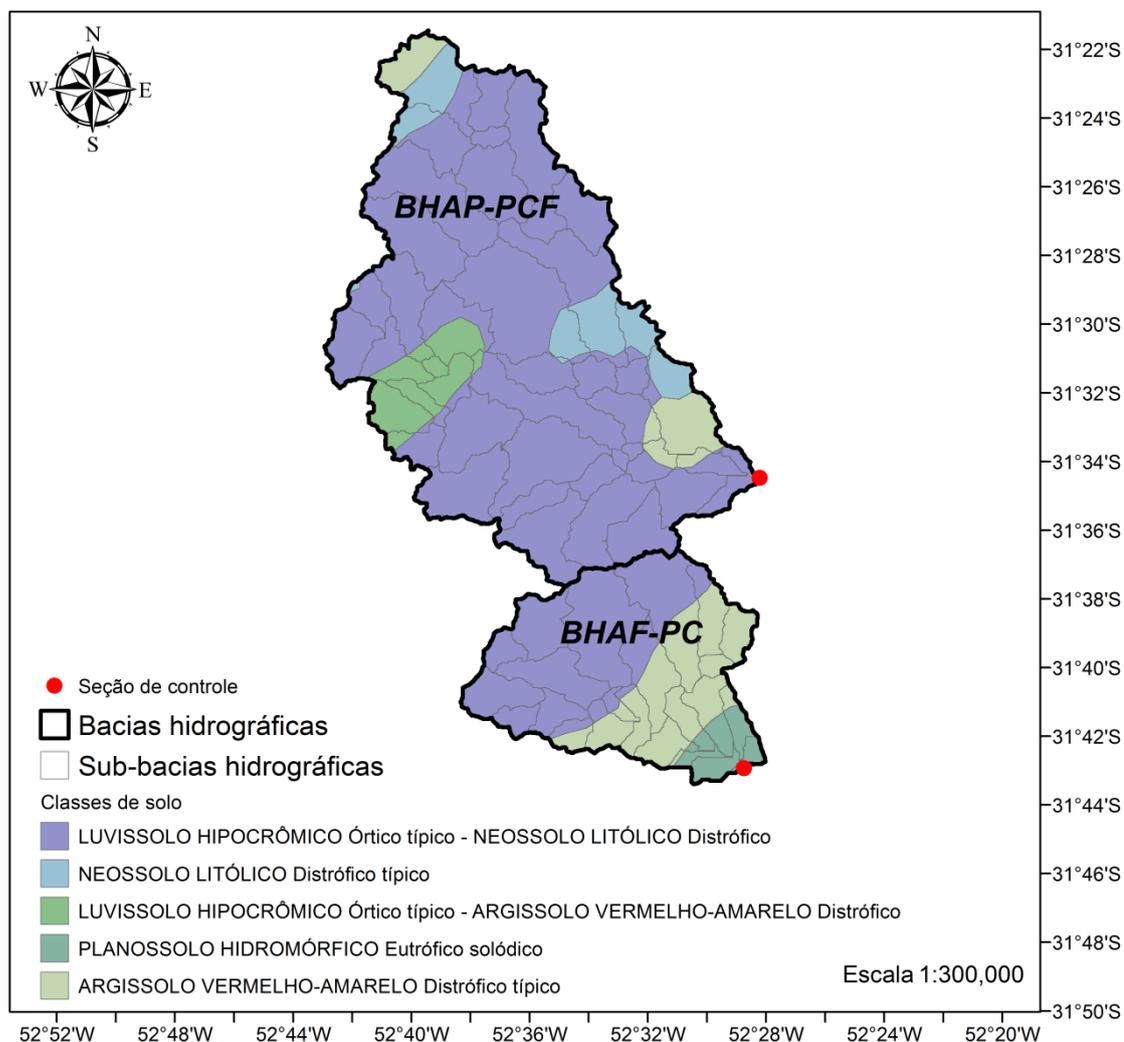


Figura 81 - Mapa de classes de solo para a área de estudo, adaptado do mapa original de Brasil (1973) para o estado do Rio Grande do Sul

Na BHAP-PCF há predominância da associação entre as classes LUVISSOLO HIPOCRÔMICO Órtico típico e NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico, ocupando 80,12% da área, seguida por NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico, com 8,16%, LUVISSOLO HIPOCRÔMICO Órtico típico associado à ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com 6,43%, e ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, com 5,29%.

Na BHAF-PC, LUVISSOLO HIPOCRÔMICO Órtico típico associado à NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico ocorre na região de cabeceira, ocupando 56,95% da área, seguida por ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico

típico, na região do médio arroio Fragata, com 34,29%, e por PLANOSSOLO HIDROMÓRFICO Eutrófico solódico, na região de planície, com 8,76%.

Tendo em vista que o modelo hidrológico LASH demanda informações acerca dos atributos de cada classe de solo identificada (Figura 81), buscou-se na literatura valores de referência para, principalmente, a profundidade do solo (Z) e para os conteúdos de água no solo referentes ao ponto da saturação (θ_s) e ao ponto de murcha permanente (θ_{PMP}).

Aquino (2014) demarcou uma transeção de 25 km ao longo da BHAP-PCF e de 15 km ao longo da BHAF-PC, com amostras equidistantes 250 m, no primeiro caso, e 150 m, no segundo. Em cada ponto amostral, o autor determinou os seguintes atributos: textura, densidade do solo, condutividade hidráulica do solo saturado, densidade de partículas, porosidade total, microporosidade e carbono orgânico. Além disso, Aquino (2014) determinou, para cada ponto da transeção, a curva de retenção de água no solo, a qual permitiu quantificar θ_s e θ_{PMP} , adotados como referência os conteúdos de água retidos às tensões de 0 kPa e 1.500 kPa, respectivamente, seguindo Reichardt e Timm (2012). Os valores representativos dos atributos do solo para cada classe foram estabelecidos pelo autor com base no mapa de classes de solo (BRASIL, 1973) e na distribuição dos atributos ao longo da transeção.

Do estudo de Aquino (2014), extraiu-se os valores de profundidade do solo, de θ_s e de θ_{PMP} , apresentados na Tabela 4, para a BHAP-PCF, e na Tabela 5, para a BHAF-PC.

Tabela 4 - Umidade do solo no ponto de saturação (θ_s), umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e profundidade do solo (Z) das classes identificadas na BHAP-PCF

Classe de solo	θ_s ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	θ_{PMP} ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	Z (mm)
LUVISSOLO HIPOCRÔMICO Órtico típico – ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico	0,455	0,174	1000
LUVISSOLO HIPOCRÔMICO Órtico típico – NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico	0,455	0,174	1000
NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico	0,495	0,186	500
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico	0,452	0,173	1500

Tabela 5 - Umidade do solo no ponto de saturação (θ_s), umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e profundidade do solo (Z) das classes identificadas na BHAF-PC

Classe de solo	θ_S ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	θ_{PMP} ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	Z (mm)
LUVISSOLO HIPOCRÔMICO Órtico típico – NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico	0,447	0,185	1000
PLANOSSOLO HIDROMÓRFIO Eutrófico solódico	0,405	0,168	500
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico	0,456	0,195	1500

2.1.3.3. Base de dados de usos do solo

A distribuição espacial das classes de uso do solo, identificadas para a área de estudo por interpretação de imagem de satélite, pode ser visualizada na Figura 82.

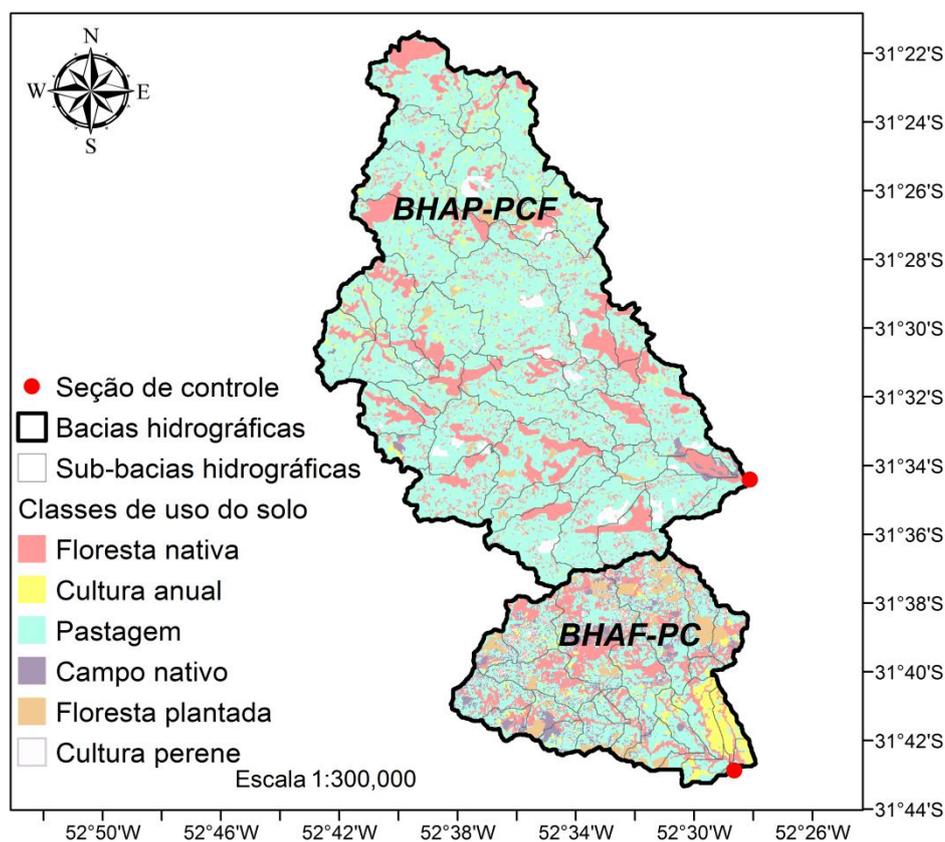


Figura 82 - Distribuição espacial das classes de uso do solo identificadas na área de estudo através da interpretação de imagem de satélite

As áreas percentuais de abrangência de cada classe de uso do solo (Figura 82) são apresentadas na Tabela 6. Tanto na BHAP-PCF quanto na BHAF-PC, o uso do solo é predominantemente agrícola, não existindo aglomerados urbanos significativos. A pastagem é o tipo de uso mais evidente, abrangendo

grande parte da área de estudo, principalmente na BHAP-PCF, seguido pela floresta nativa, que se apresenta de forma concentrada em pequenas áreas. Já a cultura anual é bastante notória na região de planície da BHAF-PC, enquanto que as regiões mais elevadas têm áreas pulverizadas cobertas por floresta plantada.

Tabela 6 - Área relativa percentual da BHAP-PCF e da BHAF-PC ocupada pelas classes de uso do solo

Classe de uso	Área (%) ocupada na	
	BHAP-PCF	BHAF-PC
Floresta nativa	19,85	21,08
Cultura anual	3,43	8,28
Pastagem	72,00	45,21
Campo nativo	0,61	12,93
Floresta plantada	1,25	8,68
Cultura perene	2,86	3,82

Considerando o fato de que o modelo hidrológico LASH requer que sejam atreladas variáveis representativas de cada classe de uso do solo, bem como o fato de que na sua terceira versão essas variáveis podem ser discretizadas no tempo, realizou-se uma busca na literatura, objetivando compilar valores de albedo, índice de área foliar (IAF), altura de planta, resistência estomática e de profundidade do sistema radicular, os quais são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores empregados para quantificar as variáveis atreladas aos usos do solo identificados na área de estudo e referência bibliográfica consultada

Classe de uso	Mês	Albedo	IAF (m.m ⁻²)	Altura (m)	Resistência estomática (s.m ⁻¹)	Profundidade do sistema radicular (mm)
Floresta nativa	janeiro	0,13				
	fevereiro	0,13				
	março	0,14				
	abril	0,15				
	maio	0,16				
	junho	0,17	6,25	10,00	100,00	2000,00
	julho	0,18				
	agosto	0,18				
	setembro	0,17				
	outubro	0,16				
	novembro	0,15				
	dezembro	0,14				
<i>Referência</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	
Cultura perene	janeiro	0,18	5,67	1,50		500,00
	fevereiro	0,18	2,97	1,50		500,00
	março	0,22	3,99	0,50		600,00
	abril	0,23	3,21	0,50		600,00
	maio	0,24	3,21	0,50		600,00
	junho	0,25	3,21	0,50	70,00	600,00
	julho	0,26	1,86	0,50		600,00
	agosto	0,25	1,86	0,50		600,00
	setembro	0,24	1,86	0,50		600,00
	outubro	0,21	1,98	0,32		545,16
	novembro	0,18	4,17	0,65		500,00
	dezembro	0,18	5,87	1,25		500,00
<i>Referência</i>	<i>d</i>	<i>f</i>	<i>f</i>	<i>c</i>	<i>g</i>	
Pastagem	janeiro	0,20	3,99			
	fevereiro	0,21	3,99			
	março	0,22	3,99			
	abril	0,23	3,21			
	maio	0,24	3,21			
	junho	0,25	3,21	0,50	70,00	600,00
	julho	0,26	1,86			
	agosto	0,25	1,86			
	setembro	0,24	1,86			
	outubro	0,23	2,67			
	novembro	0,22	2,67			
	dezembro	0,21	2,67			
<i>Referência</i>	<i>d</i>	<i>h</i>	<i>c</i>	<i>c</i>	<i>g</i>	
Campo nativo	janeiro	0,20				
	fevereiro	0,21				
	março	0,22				
	abril	0,23				
	maio	0,24	0,50	0,20	70,00	500,00
	junho	0,25				
	julho	0,26				
	agosto	0,25				
	setembro	0,24				
	outubro	0,23				

	novembro	0,22				
	dezembro	0,21				
	Referência	<i>d</i>		<i>c</i>		<i>l</i>
Floresta plantada	janeiro	0,13				
	fevereiro	0,13				
	março	0,14				
	abril	0,15				
	maio	0,16				
	junho	0,17	3,50	5,00	100,00	1500,00
	julho	0,18				
	agosto	0,18				
	setembro	0,17				
	outubro	0,16				
	novembro	0,15				
	dezembro	0,14				
	Referência	<i>a</i>	<i>j</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>E</i>
Cultura permanente	janeiro	0,18	1,82			
	fevereiro	0,18	1,83			
	março	0,18	1,84			
	abril	0,19	1,85			
	maio	0,19	2,10			
	junho	0,20	2,34			
	julho	0,20	2,55	2,00	40,00	500,00
	agosto	0,20	2,77			
	setembro	0,19	2,98			
	outubro	0,19	3,20			
	novembro	0,18	3,41			
	dezembro	0,18	3,62			
	Referência	<i>k</i>	<i>k</i>		<i>c</i>	<i>g</i>

^aMiranda *et al.* (1996), ^bMarques Filho, Dallarosa e Pachêco (2005), ^cCollischonn (2001), ^dShuttleworth (1993), ^eLima (1986), ^fManfron *et al.* (2003), ^gAllen *et al.* (1998), ^hFagundes *et al.* (2006), ⁱViola (2008), ^jAlmeida e Soares (2003), ^kFavarin *et al.* (2002)

2.2. Calibração e Validação do modelo LASH

A modelagem hidrológica na BHAP-PCF e na BHAF-PC foi conduzida empregando o período de dados observados entre 1994 e 2008, mesmo período empregado por Beskow *et al.* (2016) quando da modelagem hidrológica na BHAF-PC utilizando a segunda versão do modelo LASH (versão distribuída).

Como no início da simulação ocorrem incertezas atreladas ao desconhecimento das condições hidrológicas iniciais, especialmente quanto à umidade do solo, os dados de 1994 – primeiro ano de dados observados – foram utilizados para aquecimento do modelo, procedimento já adotado por Mello *et al.* (2008) e outros autores.

Os dados observados no período de 01/01/1995 a 31/12/2000 foram empregados para a calibração de sete parâmetros do modelo LASH (Tabela 8), em ambas as bacias hidrográficas. Para tal finalidade, definiram-se duas estratégias de calibração (EC):

- EC-1: calibração concentrada de todos os parâmetros, estimando um único valor e atribuindo este à cada sub-bacia hidrográfica.
- EC-2: Calibração concentrada de 6 parâmetros (K_S , K_{SS} , K_{CAP} , C_S , C_{SS} e C_B) e calibração distribuída do parâmetro λ , estimando um valor deste para cada sub-bacia hidrográfica.

Tabela 8 - Parâmetros calibrados e limiar estabelecido para tal finalidade

Parâmetro	Descrição	Intervalo
λ	Coefficiente de abstração inicial (adimensional)	0,01-0,5
K_B	Condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo (mm.dia ⁻¹)	0-6
K_{SS}	Condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial (mm.dia ⁻¹)	0-250
K_{CAP}	Densidade de fluxo máxima para retorno por ascensão capilar (mm.dia ⁻¹)	0-5
C_S	Parâmetro do tempo de resposta do reservatório superficial (adimensional)	10-100
C_{SS}	Parâmetro do tempo de resposta do reservatório subterrâneo (adimensional)	10-500
C_B	Parâmetro do tempo de retardo do escoamento de base (dias)	10-100

A calibração dos parâmetros apresentados na Tabela 8 foi realizada pelo algoritmo de calibração automática SCE-UA (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992) implementado junto ao modelo hidrológico LASH. Para inicializar este algoritmo foi necessário indicar o número de complexos desejados, o intervalo de variação de cada parâmetro, anteriormente apresentado (Tabela 8), o critério de parada e a função objetivo a ser utilizada.

O número de complexos (p) é fortemente dependente da natureza do problema a ser analisado (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1994). Neste estudo, p foi definido como 5, sendo que o número de pontos em cada complexo é igual a

$2n+1$ – em que n é o número de parâmetros a serem calibrados – resultando numa população inicial de 75 pontos (5 complexos x 15 pontos = 75 pontos) para EC-1 em ambas as bacias. Já para a EC-2, a população inicial de 295 pontos para a BHAF-PC e de 495 para a BHAP-PCF. Beskow *et al.* (2011) utilizaram 4 complexos para calibrar 6 parâmetros do modelo LASH através do SCE-UA.

O critério de parada foi definido pelo número máximo de iterações, tendo sido escolhidas 10.000 iterações. Beskow, Mello e Norton (2011) também utilizaram como critério de parada o número de iterações, empregando 500 para calibrar 13 parâmetros do modelo LASH, enquanto que Beskow *et al.* (2011) utilizaram 1.000 iterações para calibrar 6 parâmetros e Beskow *et al.* (2016) utilizaram 2.000 iterações para calibrar 7 parâmetros.

A calibração, tanto para a BHAP-PCF quanto para BHAF-PC, foi mono-objetivo, contudo foram utilizadas 3 funções distintas, a saber: o coeficiente de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), o coeficiente de Nash-Sutcliffe na sua versão para valores logaritmizados ($C_{NS} \log(Q)$) e a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), tendo sido escolhido o conjunto de parâmetros da melhor iteração dentre os 3 conjuntos resultantes.

O C_{NS} (NASH; SUTCLIFFE, 1970) traduz a eficiência do modelo para estimativas mais acertadas nas cheias, ou seja, quando observam-se vazões bastante elevadas (GUILHON; ROCHA, 2007), enquanto que o $C_{NS} \log(Q)$ possibilita verificar a capacidade do modelo em estimar vazões durante o período de estiagem (BESKOW, 2009).

Estas medidas estatísticas são definidas como:

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_i} - Q_{est_t})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_t} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (51)$$

$$C_{NS} \log(Q) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{obs_t}) - \log(Q_{obs_t}))^2}{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{obs_t}) - (\log \bar{Q}_{obs}))^2} \quad (52)$$

onde Q_{obs_t} é a vazão observada no tempo $t=i$, Q_{est_t} é a vazão estimado no tempo $t=i$, \bar{Q}_{obs} é a vazão média observada, e N é o número de ordenadas do hidrograma.

De acordo com Zhang *et al.* (2007), o valor do C_{NS} indica o ajustamento dos dados simulados aos dados observados na reta 1:1, podendo variar de $-\infty$ a 1, sendo que Moriasi *et al.* (2007) sugere a seguinte classificação para C_{NS} : $C_{NS} > 0,65$, muito bom; $0,54 < C_{NS} < 0,65$, bom; $0,50 < C_{NS} < 0,54$, satisfatório. Outros autores sugerem outras classificações para o C_{NS} , como Zappa (2002), o qual indica que os modelos podem ser utilizados para simulação se C_{NS} for superior à 0,5, e como Gottschalk e Motovilov (2000), os quais indicam um ajuste ótimo quando C_{NS} é igual a 1, um ajuste bom e adequado quando C_{NS} é superior a 0,75 e aceitável para valores entre 0,36 e 0,75.

Já o RMSE (Equação ((53) permite quantificar o erro da estimativa, indicando se o modelo super ou subestima os valores observados de vazão (COLLISCHONN, 2001). Para o RMSE não existe uma classificação, pois seu valor é totalmente dependente da magnitude da variável analisada, contudo, quanto mais próximo de zero, melhor o desempenho do modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Q_{obs_t} - Q_{est_t})^2} \quad (53)$$

em que Q_{obs_t} é a vazão observada no tempo $t=i$, Q_{est_t} é a vazão estimado no tempo $t=i$ e n é o número de ordenadas do hidrograma.

O erro relativo da estimativa de vazões (ΔQ) (Equação (54) permite analisar se o modelo super ou subestima as estimativas com relação aos valores observados, sendo que valores negativos refletem subestimativa, positivos refletem superestimativa e 0 reflete um ajuste perfeito. Para Van Liew, Arnold e Garbrecht (2003), valores de ΔQ inferiores a 10% representam um ajuste muito bom, entre 10 e 15%, um ajuste bom, entre 15 e 25%, satisfatório, e acima de 25% as estimativas são inadequadas no tocante à tendência. Neste estudo, ΔQ foi empregado apenas como estatística de análise, e não função objetivo de calibração.

$$\Delta Q = \frac{\sum_{t=1}^N Q_{est_t} - \sum_{t=1}^N Q_{obs_t}}{\sum_{t=1}^N Q_{obs_t}} \quad (54)$$

em que Q_{obs_t} é a vazão observada no tempo $t=i$, Q_{est_t} é a vazão estimado no tempo $t=i$ e n é o número de ordenadas do hidrograma.

Com relação à validação do modelo LASH para ambas as bacias hidrográficas contempladas neste estudo, foi empregado o *Split sample test*, utilizando os dados observados entre 01/01/2001 a 31/12/2008. Nesta etapa foi realizado um estudo comparativo entre as séries de vazões observadas nas seções de controle e as séries de vazões simuladas pelo modelo LASH, assim como foi analisada a qualidade da estimativa de vazões de pico e períodos de estiagem, empregando para tal fim o C_{NS} , o $C_{NS} \log(Q)$, o RMSE e o ΔQ .

3 Resultados e Discussão

3.1. Estimativa e comportamento dos parâmetros de calibração

A Figura 83 e a Figura 84 permitem visualizar, para a BHAP-PCF, o processo de convergência dos parâmetros calibrados pelo algoritmo de calibração automática SCE-UA, seguindo a EC-1 e a EC-2, respectivamente. A convergência dos parâmetros calibrados para a BHAF-PC pode ser visualizada na Figura 85, para a EC-1, e na Figura 86, para a EC-2.

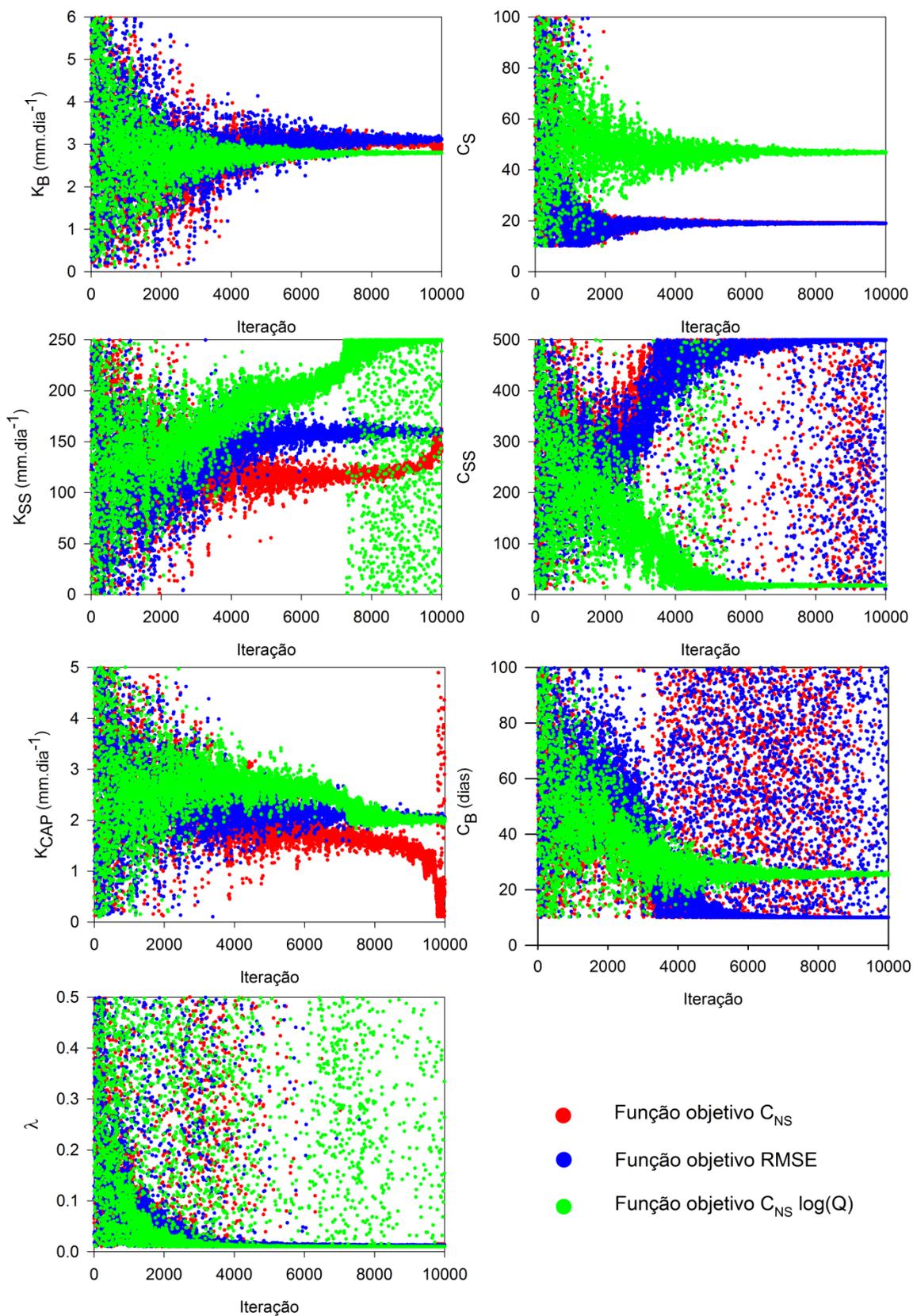


Figura 83 - Convergência dos parâmetros de calibração da terceira versão do modelo LASH para a BHAP-PCF, empregando a EC-1, o algoritmo de calibração automática SCE-UA e três diferentes funções objetivo

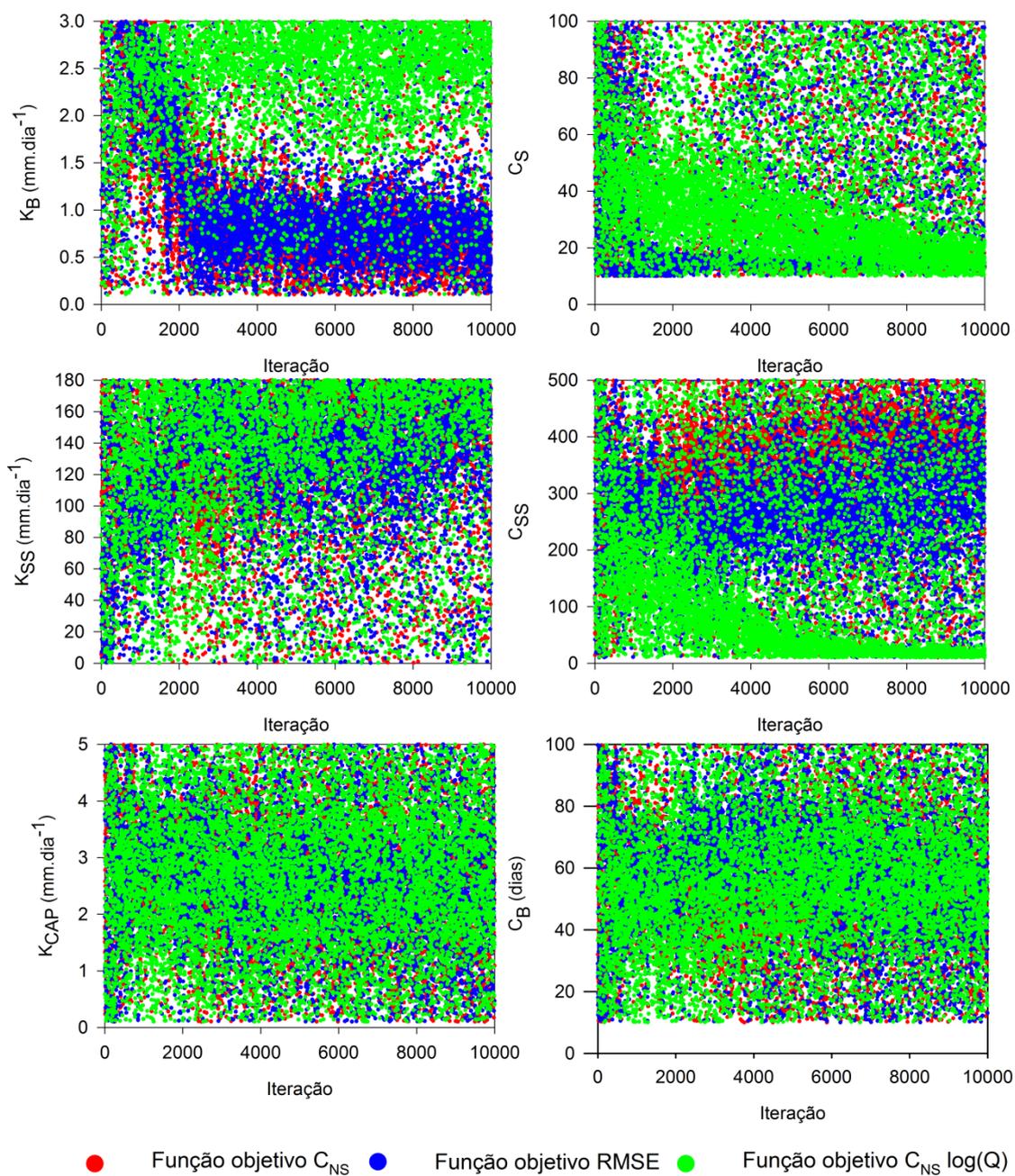


Figura 84 - Convergência dos parâmetros de calibração da terceira versão do modelo LASH para a BHAP-PCF, empregando a EC-2, o algoritmo de calibração automática SCE-UA e três diferentes funções objetivo

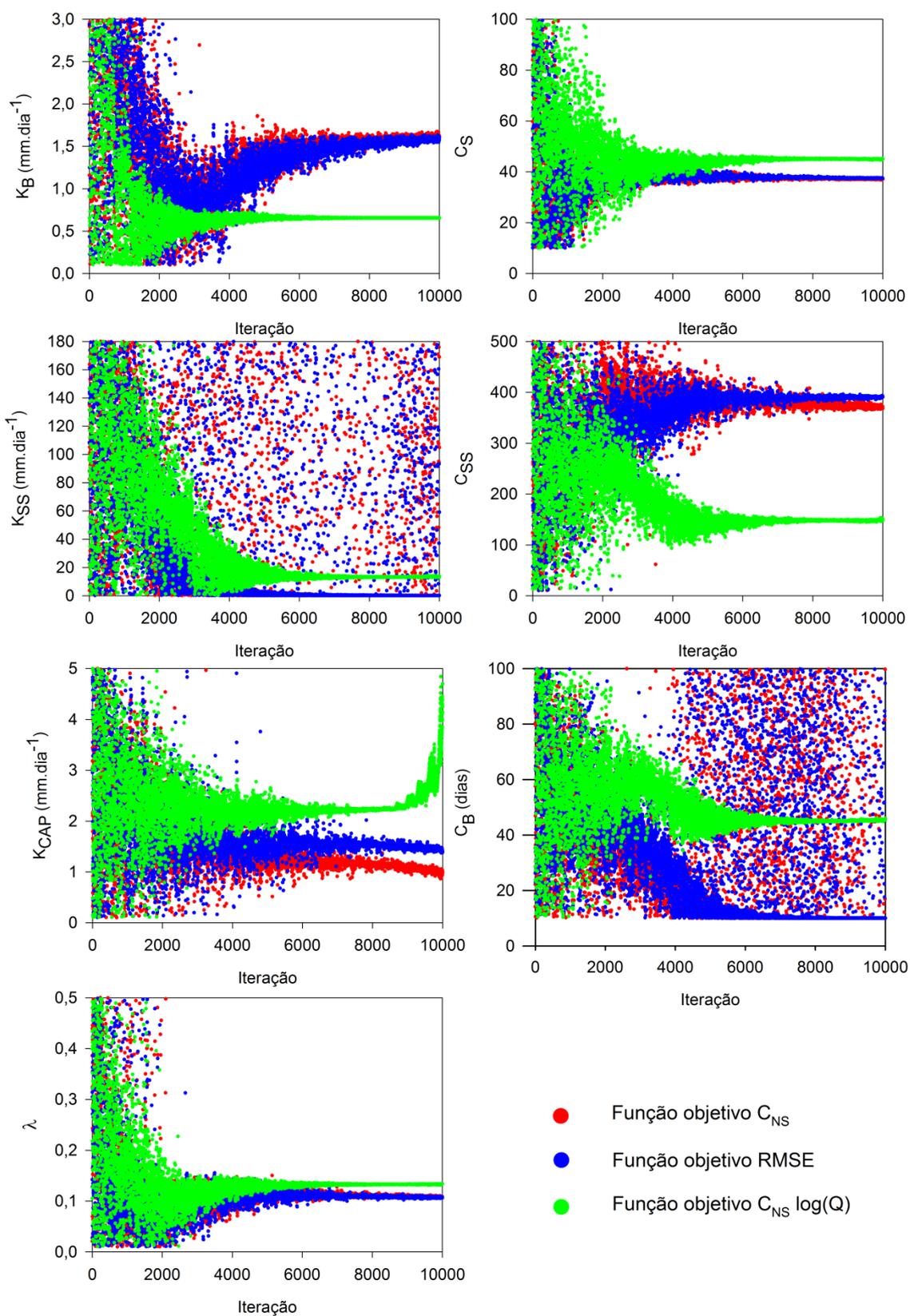


Figura 85 - Convergência dos parâmetros de calibração da terceira versão do modelo LASH para a BAHF-PC, empregando a EC-1, o algoritmo de calibração automática SCE-UA e três diferentes funções objetivo

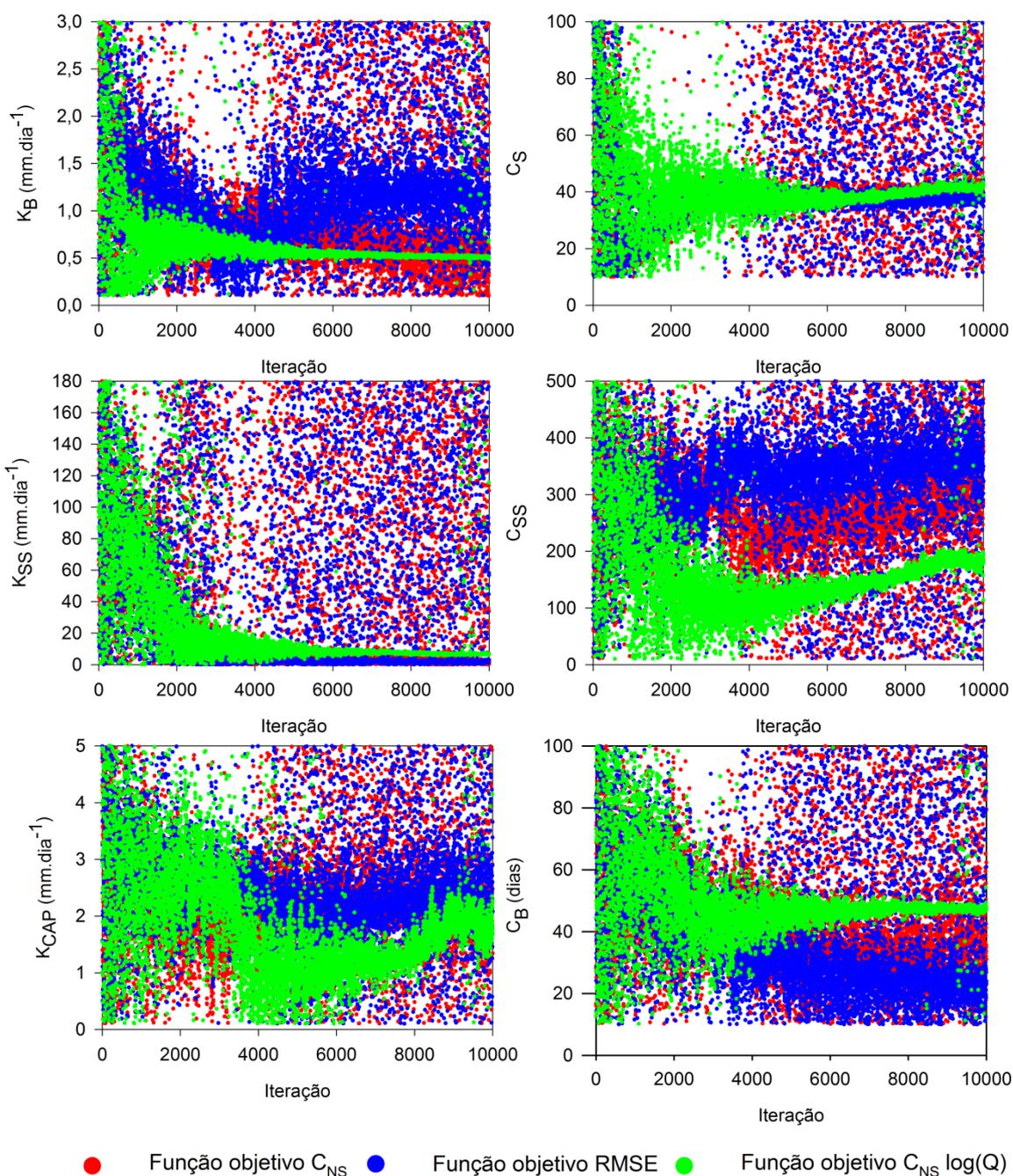


Figura 86 - Convergência dos parâmetros de calibração da terceira versão do modelo LASH para a BHAF-PC, empregando a EC-2, o algoritmo de calibração automática SCE-UA e três diferentes funções objetivo

Na Figura 83 e na Figura 85, observa-se claramente que o algoritmo de calibração automática, seguindo a EC-1, conseguiu atingir a convergência de todos os parâmetros para as três funções objetivo. O mesmo comportamento é verificado, embora não tão evidente, para a BHAF-PC quando da calibração pela

EC-2, contudo, para a BHAP-PCF, seguindo esta estratégia, não houve convergência notória.

Quando analisado o processo de convergência de cada parâmetro, de forma isolada, observa-se que existe diferença no desempenho do algoritmo de calibração entre as funções objetivo, especialmente quando empregada a $C_{NS} \log(Q)$, para a qual as estatísticas de precisão apresentaram resultados mais satisfatórios. Salienta-se que, independentemente da configuração, o algoritmo de calibração automática SCE-UA permite apenas a otimização de parâmetros com base nos valores de uma função objetivo (calibração mono-objetivo).

Os resultados de convergência ilustrados para as diferentes funções objetivo vão de encontro às constatações de Collischonn e Tucci (2003) a respeito das limitações e cautela existentes na utilização de algoritmos mono-objetivos. Além disso, para Vieux (2004), a interação entre parâmetros, a estabilidade de parâmetros entre diferentes eventos de chuva e a variação interanual dos parâmetros tornam a calibração de modelos conceituais chuva-vazão complicada, independente do algoritmo de busca empregado. A dificuldade de calibração em virtude da interação entre parâmetros, conforme apontado por Vieux (2004), pode ter sido a principal causa da não convergência pela EC-2 para a BHAP-PCF dado o maior número de parâmetros calibrados (6 concentrados + 1 distribuído em 43 sub-bacias) quando comparado à BHAF-PC (6 concentrados + 1 distribuído em 23 sub-bacias).

A escolha adequada de uma função objetivo depende, contudo, não somente do desempenho visual e estatístico, mas também do uso futuro dos resultados obtidos; dependendo da função objetivo escolhida, pode-se privilegiar o ajuste mais acurado de certos períodos do hidrograma, como no caso da aplicação do $C_{NS} \log(Q)$, o qual dá maior importância à qualidade do ajuste do modelo frente à estimativa de vazões de estiagem, como relata Beskow (2009).

Deve ser ressaltado ainda que os valores escolhidos para cada parâmetro de calibração podem ser bastante variáveis dependendo da função objetivo, conforme pode ser observado nas figuras apresentadas anteriormente; ou seja, mesmo utilizando um algoritmo sofisticado de calibração automática, não se pode dispensar o conhecimento do hidrólogo no tocante aos processos hidrológicos e a representatividade de cada parâmetro para a bacia em estudo, haja vista que o

processo de calibração pode resultar em hidrogramas estatisticamente satisfatórios, porém baseados em parâmetros com valores irreais para a bacia, ou então, em equifinalidade, onde vários conjuntos de parâmetros proporcionam resultados satisfatórios e bastante semelhantes entre si (BEVEN, 2004).

Na Tabela 9 podem ser visualizados, para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC, os valores dos parâmetros calibrados pela EC-1, a saber: coeficiente de abstração inicial (λ), condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo (K_B), condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial (K_{SS}), densidade de fluxo máxima de retorno por ascensão capilar (K_{CAP}), parâmetro associado ao tempo de resposta do reservatório superficial (C_S), parâmetro associado ao tempo de resposta do reservatório subsuperficial (C_{SS}) e tempo de retardo do escoamento de base (C_B). Ainda na Tabela 9 pode-se visualizar os valores dos parâmetros calibrados pela EC-2, para ambas as bacias, com exceção dos valores do parâmetro λ , para o qual apresenta-se seus limites inferior e superior de variação. Estes parâmetros representam a melhor iteração para cada estratégia de calibração e bacia hidrográfica, escolhidas manualmente com base nas estatísticas de precisão empregadas e representatividade dos parâmetros.

Tabela 9 - Parâmetros calibrados no modelo LASH para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC

Parâmetro	EC-1		EC-2	
	BHAP-PCF	BHAF-PC	BHAP-PCF	BHAF-PC
λ	0,024	0,115	0,017-0,465	0,018-0,463
K_{CAP} (mm.dia ⁻¹)	2,927	2,021	3,543	0,632
K_B (mm.dia ⁻¹)	1,866	0,634	2,396	0,588
K_{SS} (mm.dia ⁻¹)	137,489	5,261	52,389	2,455
C_S	28,658	46,558	20,908	50,173
C_{SS}	241,114	165,444	94,648	151,228
C_B	44,336	57,543	51,344	48,936

O valor calibrado para o parâmetro λ pela EC-1 foi de 0,024 para a BHAP-PCF e de 0,115 para a BHAF-PC, enquanto que pela EC-2, os valores deste parâmetro variaram entre 0,017 e 0,465, para a BHAP-PCF, e entre 0,018 e 0,463, para a BHAF-PC. Beskow *et al.* (2009a) e Mishra *et al.* (2006), ao empregar o método do CN Modificado para análise do escoamento superficial direto em bacias hidrográficas, constataram que este parâmetro pode apresentar considerável variação dependendo da bacia hidrográfica analisada; no estudo de Beskow *et al.* (2009a), λ foi de 0,105 para uma bacia hidrográfica de 4,7 km²,

localizada no estado de Minas Gerais, enquanto que Mishra *et al.* (2006) encontraram valores variando entre 0 e 0,21 para diversas bacias hidrográficas americanas, cujas áreas de drenagem variavam entre 0,17 e 74 ha.

Quando analisados os valores de λ obtidos a partir da calibração do modelo hidrológico LASH, empregando o método do CN Modificado para estimativa do escoamento superficial direto, destacam-se os estudos de Mello *et al.* (2008), Viola *et al.* (2009), Beskow *et al.* (2011) e Beskow *et al.* (2016). Mello *et al.* (2008), empregando a primeira versão do modelo LASH (versão semidistribuída por sub-bacias hidrográficas), calibraram valores de λ variando entre 0,001 e 0,5 para uma bacia de 2.080 km², enquanto Viola *et al.* (2009), utilizando a mesma versão do modelo em uma bacia de 2.094 km², encontrou valores entre 0,01 e 0,2. Já com a segunda versão do modelo LASH (versão distribuída por células), Beskow *et al.* (2011) calibraram o valor de 0,105, para uma bacia de 32 km², e Beskow *et al.* (2016) encontraram λ de 0,147 para a BHAF-PC quando da utilização da segunda versão do LASH.

Os resultados encontrados por Mello *et al.* (2008), Viola *et al.* (2009) e Beskow *et al.* (2011) indicam que a calibração do parâmetro λ é indispensável para o desempenho satisfatório do modelo na geração do escoamento superficial direto, corroborando com as conclusões de Mishra *et al.* (2006), Mello *et al.* (2008), Beskow *et al.* (2009a), Beskow, Mello e Norton (2011), Viola *et al.* (2014) e Beskow *et al.* (2016).

Para Beskow, Mello e Norton (2011) e Beskow *et al.* (2011), não é aconselhável empregar o valor fixo de 0,2 para λ , conforme recomenda SCS (1971) quando da utilização do método do CN. Segundo Mishra *et al.* (2003), variações nos valores de λ entre bacias hidrográficas ocorrem devido a alguns fatores, como as diferenças climáticas, as diferenças no padrão de precipitação e as condições iniciais de umidade do solo. Além disso, este parâmetro apresenta relação direta com as abstrações iniciais, de modo que quanto menor for o valor de λ para um mesmo evento de chuva, mais rápido será o início da transformação da chuva em chuva efetiva, portanto, o tipo de solo também exerce grande influência na gênese do escoamento superficial direto e no valor deste parâmetro para uma bacia hidrográfica.

Os valores calibrados pela EC-1 para K_B e K_{SS} foram de 1,866 mm.dia⁻¹ e 137,489 mm.dia⁻¹, para a BHAP-PCF, e de 0,634 mm.dia⁻¹ e 5,261 mm.dia⁻¹, para a BHAF-PC, enquanto que pela EC-2, foram de 2,396 mm.dia⁻¹ e 52,389 mm.dia⁻¹, para a BHAP-PCF, e de 0,588 mm.dia⁻¹ e 2,455 mm.dia⁻¹, para a BHAF-PC. Viola *et al.* (2009), empregando a primeira versão do modelo LASH para uma bacia de 2.094 km², obtiveram valores de K_B entre 0,1 e 2,5 mm.dia⁻¹ e de K_{SS} entre 0,01 e 82,65 mm.dia⁻¹, enquanto Mello *et al.* (2008), utilizando a mesma versão para uma bacia de 2.080 km², encontraram valores variando entre 12 e 182,4 mm.dia⁻¹ para K_{SS} e 0,9 mm.dia⁻¹ para K_B . Já Beskow *et al.* (2011), obtiveram K_B igual a 3,18 mm.dia⁻¹ e K_{SS} igual a 182,15 mm.dia⁻¹, para uma bacia de 32 km², empregando a primeira versão do modelo LASH, assim como Beskow *et al.* (2016), os quais encontraram valores de 0,192 mm.dia⁻¹ e 2,08 mm.dia⁻¹ para K_B e K_{SS} , respectivamente, ao calibrar a segunda versão para a BHAF-PC.

Considerando que os parâmetros K_B e K_{SS} estão intimamente associados ao tipo de solo, variações nos seus valores são esperadas para diferentes bacias hidrográficas. A semelhança entre os valores obtidos por Beskow *et al.* (2011) para a bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará (32 km²) e aqueles obtidos neste estudo para a BHAP-PCF, bem como a notória diferença destes quando comparados aos valores obtidos para a BHAF-PC, podem ser parcialmente explicadas pelos valores de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{SAT}). Alvarenga *et al.* (2011) obtiveram valores de K_{SAT} entre 61 e 146 mm.h⁻¹ para a bacia hidrográfica analisada por Beskow *et al.* (2011), enquanto que Aquino (2014) encontrou um valor médio de K_{SAT} de 101 mm.h⁻¹ para a BHAP-PCF e de 18 mm.h⁻¹ para a BHAF-PC.

Baseando-se na classificação dos valores de K_{SAT} para solos brasileiros, proposta por Pruski *et al.* (1997) visando a aplicação do método do CN (SCS, 1971), os valores obtidos para a BHAP-PCF indicam infiltração superior a média, enquanto que para a BHAF-PC, abaixo da média, tendo potencial para geração de escoamento superficial direto acima da média.

Os valores obtidos para estes parâmetros no presente estudo são condizentes com os solos encontrados na BHAP-PCF e na BHAF-PC, especialmente quando comparados a outros estudos usando o modelo LASH. Nos estudos de modelagem hidrológica conduzidos por Mello *et al.* (2008) e por

Viola *et al.* (2009), por exemplo, para os quais a classe de solo predominante era Cambissolo, foram encontrados valores de K_B e de K_{SS} inferiores àqueles obtidos por Beskow *et al.* (2011), cuja bacia analisada apresenta predominância de Latossolos.

O parâmetro C_B , o qual diz respeito ao tempo de retardo do reservatório subterrâneo, é muito importante para o entendimento do comportamento do escoamento de base em uma bacia hidrográfica. Este parâmetro pode ser calibrado ou então obtido a partir da análise de um período de recessão do hidrograma observado na seção de controle de interesse, como recomenda Viola (2008) e emprega Beskow *et al.* (2011) e Viola *et al.* (2013).

No entanto, sabe-se que pode haver uma variação nesse tempo quando da análise de diferentes períodos de recessão, como observa-se na Tabela 10 para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC, onde vários períodos de recessão foram empregados para a estimativa de C_B . Analisando o período de recessão mais evidente na BHAP-PCF, pode-se observar que o valor de C_B estimado foi de 157 dias, enquanto que o valor calibrado foi de 44,336 dias pela EC-1 e de 51,344 dias pela EC-2. A mesma análise pode ser feita para a BHAF-PC, para a qual o período de recessão mais evidente indicou C_B de 35 dias, enquanto que o valor calibrado foi de 57,543 dias pela EC-1 e de 48,936 dias pela EC-2.

Tabela 10 - Valores de C_B para diferentes períodos de recessão

BHAP-PCF		BHAF-PC	
Período da recessão	C_B calculado (dias)	Período da recessão	C_B calculado (dias)
26/01/1995-09/02/1995	21	18/05/1996-13/06/1996	35
20/05/1995-06/06/1995	88	24/03/1997-01/04/1997	16
18/05/1996-14/06/1996	157	28/04/1997-12/05/1997	26
28/04/1997-12/05/1997	40	15/11/1999-24/11/1999	28
21/02/2004-06/03/2004	33	26/07/2000-7/08/2000	27

Tendo em vista que o valor estimado de C_B depende fortemente da experiência do hidrólogo, no que diz respeito a escolha do período de recessão, a consideração da calibração deste parâmetro pode reduzir as incertezas quanto ao mesmo, especialmente em bacias hidrográficas onde o escoamento de base é significativo.

3.2. Análise da precisão do modelo pela EC-1

A Figura 87 e a Figura 88 ilustram os hidrogramas observados e estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-1, considerando separadamente os períodos de calibração e de validação, para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC, respectivamente.

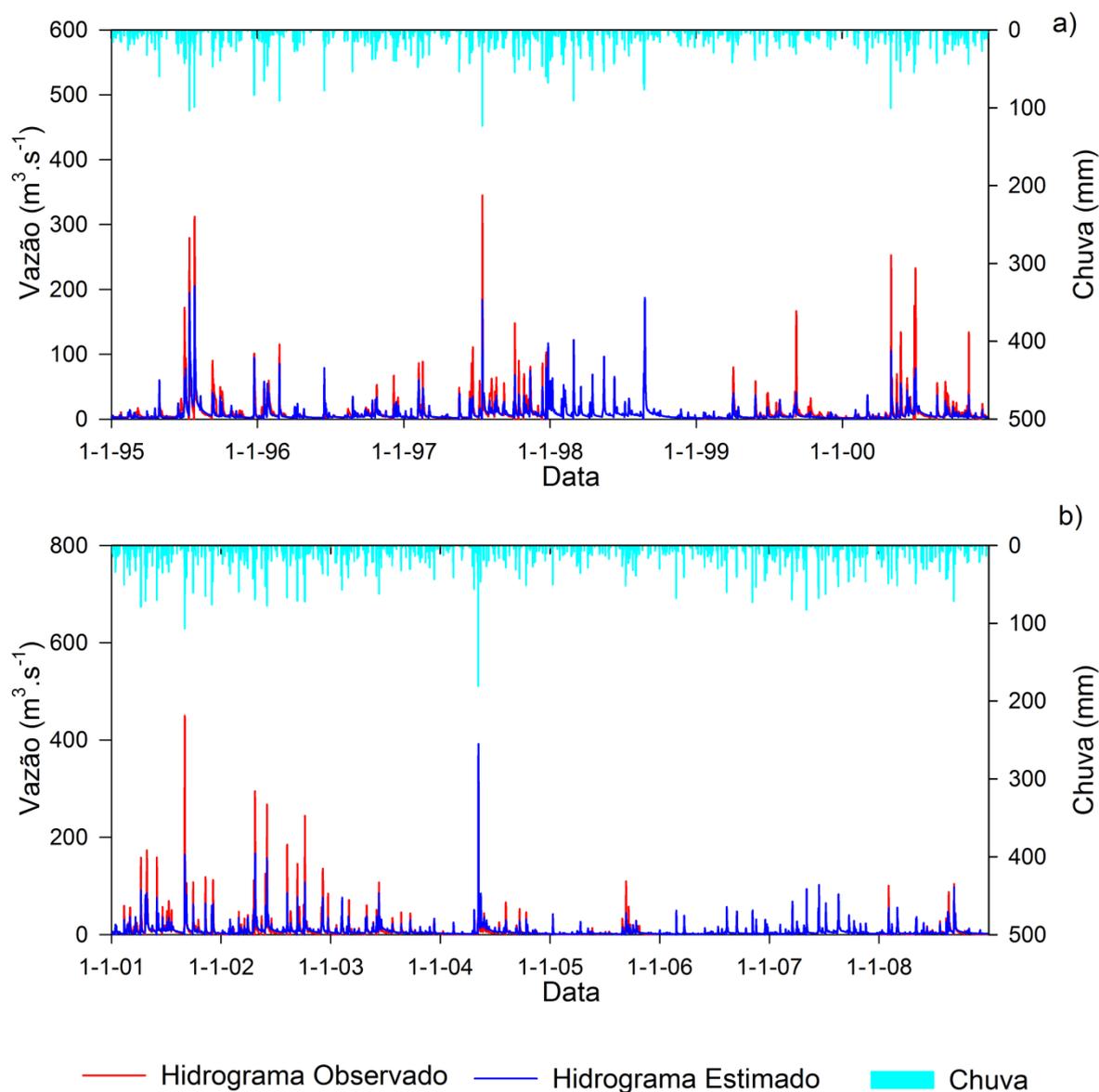


Figura 87 - Pluviogramas médios observados na BHAP-PCF, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-1 e o intervalo de tempo diário

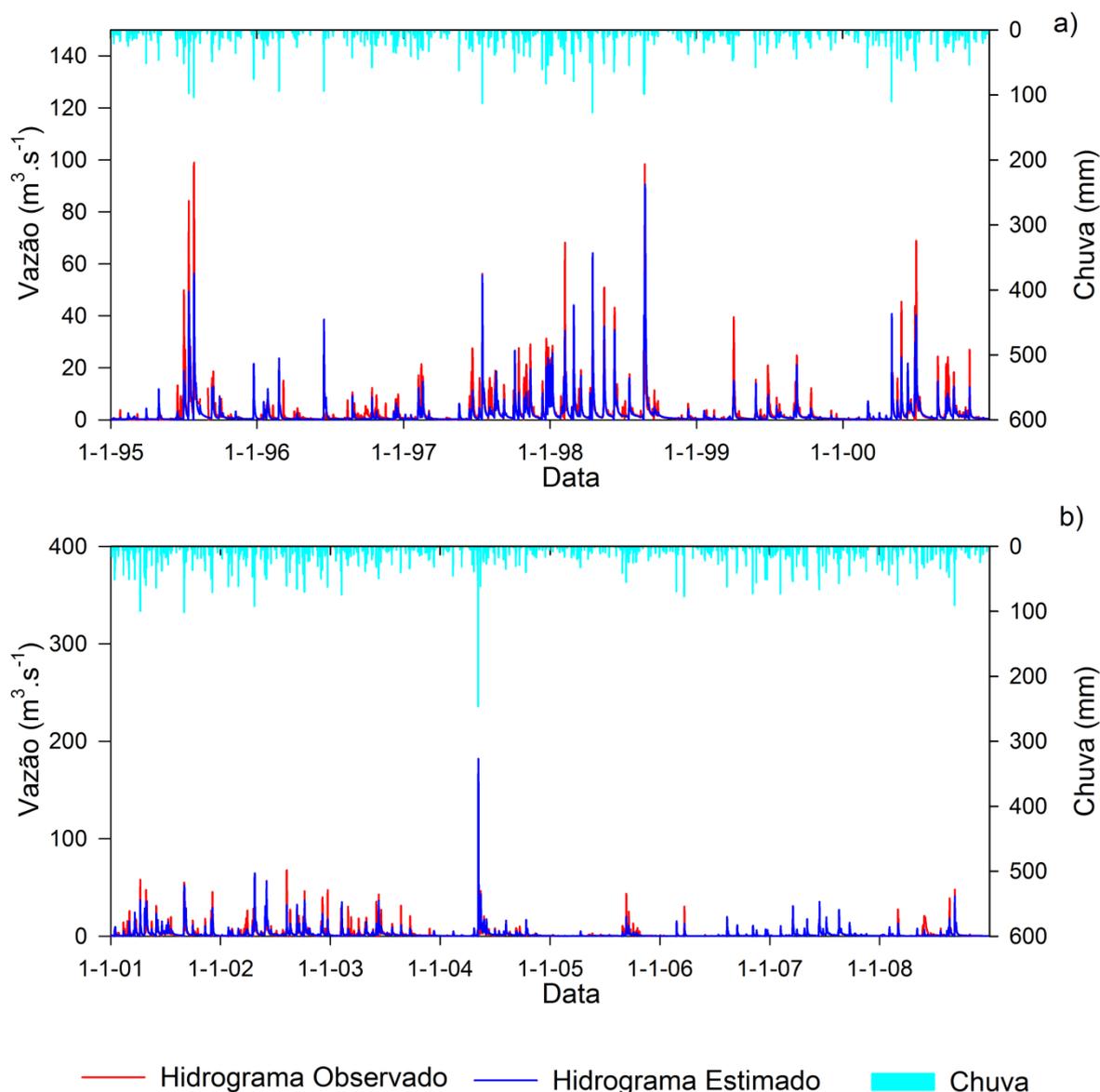


Figura 88 - Pluviogramas médios observados na BAHF-PC, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-1 e o intervalo de tempo diário

A partir de uma análise visual dos hidrogramas estimados apresentados na Figura 87 e na Figura 88, pode-se constatar que o modelo LASH foi capaz de capturar o comportamento geral dos hidrogramas observados. O mesmo pode ser constatado ao analisar a Tabela 11, a qual permite visualizar, para as duas bacias hidrográficas, os valores das medidas estatísticas empregadas para avaliar o desempenho do modelo LASH nas etapas de calibração e de validação.

Tabela 11 - Medidas estatísticas para avaliação do desempenho da terceira versão do modelo hidrológico LASH frente aos períodos de calibração e validação, para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC, obtidas através da EC-1

Medida estatística	BHAP-PCF		BHAF-PC	
	Calibração	Validação	Calibração	Validação
C_{NS}	0,65	0,70	0,73	0,53
$C_{NS} \log(Q)$	0,64	0,75	0,66	0,75
RMSE	12,63	11,94	3,42	4,09
ΔQ (%)	-26,88	-8,43	-17,43	-11,71

Embora várias medidas estatísticas venham sendo empregadas na literatura para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos, a *American Society of Civil Engineers* (ASCE, 1993) recomenda que seja adotado o C_{NS} . Os valores de C_{NS} para a BHAP-PCF foram de 0,65 para a calibração e de 0,70 para a validação, enquanto que para a BHAF-PC foram de 0,73 e de 0,53, respectivamente.

Considerando a classificação proposta por Zappa (2002) para o C_{NS} , o modelo LASH pode ser utilizado para modelagem hidrológica em ambas as bacias, uma vez que os valores dessa estatística (Tabela 11) foram superiores a 0,5. A classificação indicada por Gottschalk e Motovilov (2000) aponta que o ajuste do hidrograma estimado ao hidrograma observado é “aceitável” ($0,36 < C_{NS} < 0,75$) tanto para o período de calibração quanto para o período de validação, para duas bacias. Já pela classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007), o ajuste dos períodos de calibração e validação para a BHAP-PCF, bem como do período de calibração para a BHAF-PC, pode ser considerado “muito bom”, enquanto que o período de validação para a BHAF-PC pode ser considerado “satisfatório”.

Diversos estudos acerca da aplicação de modelos hidrológicos têm empregado este coeficiente para avaliar a acurácia dos resultados obtidos. Notter *et al.* (2007), na região do Monte Kenya, África, aplicaram o NRM3 *Streamflow Model* e obtiveram C_{NS} de 0,69 na calibração e de 0,51 na validação. Licciardello *et al.* (2007) aplicaram o modelo hidrológico *Agricultural Non Point Source Pollution* (AGNPS) a uma bacia hidrográfica da região do mediterrâneo, sul da Itália, e obtiveram C_{NS} de 0,77 na calibração e de 0,80 na validação. Collischonn *et al.* (2005), aplicando o um modelo hidrológico distribuído à bacia hidrográfica do

rio Uruguai, sul do Brasil, obtiveram C_{NS} igual a 0,75, assim como Thanapakpawin *et al.* (2007), no caso de modelagem distribuída em uma bacia hidrográfica da Tailândia. Viola *et al.* (2009) aplicou a primeira versão do modelo LASH para uma bacia hidrográfica localizada no sudeste do Brasil, obtendo valores de C_{NS} igual a 0,87 na calibração e 0,92 na validação. Beskow (2009) obteve C_{NS} de 0,82 e de 0,76 para os períodos de calibração e validação, respectivamente, da segunda versão do modelo LASH em uma pequena bacia do sudeste do Brasil. Em todas essas situações os modelos foram considerados de boa precisão e passíveis de aplicação para simulação hidrológica nas regiões mencionadas, assim como indicam os resultados obtidos neste estudo.

Analisando a estatística $C_{NS} \log(Q)$ (Tabela 11), tem-se os valores de 0,64 e 0,75 e de 0,66 e 0,75 para os períodos de calibração e de validação para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC, respectivamente. A classificação proposta de Zappa (2002) indica que o LASH pode ser empregado para modelagem hidrológica nas duas bacias, enquanto que a classificação de Gottschalk e Motovilov (2000) indica um ajuste “bom e adequado” para o período de calibração e “aceitável” para o período de validação, tanto na BHAP-PCF quanto na BHAF-PC. A classificação de Moriasi *et al.* (2007) indica um ajuste “bom” para o período de calibração para a BHAP-PCF e “muito bom” para os demais períodos.

Quando analisada na sua versão logarítmica, a estatística C_{NS} é bastante influenciada pelos períodos de recessão dos hidrogramas, haja vista o amortecimento da amplitude proporcionada pela escala (VIOLA *et al.*, 2009). Baseando-se nessa afirmativa, pode-se inferir que o modelo LASH foi capaz de capturar adequadamente, para as duas bacias hidrográficas analisadas, o comportamento hidrológico em épocas de estiagem, podendo-se inferir ainda que o mesmo tem potencial para ser empregado visando à estimativa de vazões mínimas, as quais são de suma importância para gestão dos recursos hídricos.

A estatística RMSE, por sua vez, apresentou valores de 12,63 e 11,94 e de 3,42 e 4,09 para os períodos de calibração e de validação da BHAP-PCF e da BHAF-PC, respectivamente. Tendo em vista que os valores de RMSE são fortemente influenciados pela magnitude das vazões, não é indicado que esta seja empregada para comparar o desempenho de um modelo em diferentes bacias hidrográficas, como é o caso do C_{NS} , do $C_{NS} \log(Q)$ e do ΔQ .

Com relação aos valores da estatística ΔQ (Tabela 11) para a BHAP-PCF, pode-se verificar que, de uma forma geral, as vazões estimadas pelo modelo LASH no período de calibração foram subestimadas em cerca de 26,88% quando comparadas às vazões observadas, enquanto que no período de validação houve uma subestimativa de 8,43%. Para os hidrogramas estimados para a BHAF-PC, os valores de ΔQ (Tabela 11) permitem inferir que, quando comparados aos hidrogramas observados, houve subestimativa tanto na calibração quanto na validação, sendo de aproximadamente 17% no primeiro período e de aproximadamente 12% no segundo.

Observando a classificação indicada por Van Liew, Arnold e Garbrecht (2003) e os resultados obtidos neste estudo para a estatística ΔQ , pode-se constatar que, para a BHAP-PCF, o período de calibração teve ajuste “inadequado” ($\Delta Q > 25\%$) em termos de tendência a super ou subestimativa das vazões, e que o período de validação apresentou um ajuste “muito bom”. No caso da BHAF-PC, o valor de ΔQ para a calibração indica um ajuste “satisfatório”, enquanto que para validação, um ajuste “bom”. Neste sentido, pode-se inferir que o modelo LASH foi adequado para as duas bacias analisadas, super ou subestimando as vazões dentro de um limite aceitável, de acordo com o que recomenda Van Liew, Arnold e Garbrecht (2003).

Como pode-se observar na Figura 87 e na Figura 88, o modelo LASH subestimou e superestimou vazões de pico observadas em alguns dias, tanto do período de calibração quanto no de validação. Ainda que este comportamento seja indesejável, tem sido comumente observado em modelos hidrológicos, podendo ser atribuído, segundo Mello *et al.* (2008), à formulação do modelo e aos conjuntos de dados empregados na sua aplicação.

Nos estudos de Beskow *et al.* (2011), com o modelo LASH, de Bormann *et al.* (2007), os quais empregaram os modelos hidrológicos SWAT, TOPLATS (TOPMODEL baseado em um esquema de transferência superfície-atmosfera) e WASIM (*Water balance Simulation Model*), de Gomes *et al.* (2008), que utilizaram o modelo LISEM, de Green *et al.* (2006), os quais empregaram o modelo SWAT, de Notter *et al.* (2007), com o NRM3 *Streamflow Model*, de Thanapakpawin *et al.* (2007), que utilizaram o modelo DHSVM, e de Viola *et al.* (2009), os quais

utilizaram o modelo LASH, por exemplo, o mesmo comportamento – de sub ou superestimativa das vazões pico – pode ser observado.

Segundo Viola *et al.* (2009), os modelos hidrológicos geralmente apresentam limitações para estimar vazões de pico por diversas razões, estando estas especialmente relacionadas à representatividade da variabilidade espacial da chuva e ao intervalo de simulação adotado na modelagem. Para Green *et al.* (2006), a representatividade da curva-chave, a rede de monitoramento existente e a distribuição das estações pluviométricas na área de estudo são alguns aspectos que exercem influência sobre a estimativa das vazões de pico.

Embora seja um processo complexo, a estimativa de vazões de pico é de suma importância para diversos fins práticos – como projetos hidráulicos, sistemas de conservação do solo em bacias hidrográficas, gestão de cheias, etc. – sendo fundamental que o modelo hidrológico produza resultados satisfatórios no tocante a esta variável.

A fim de melhor analisar o desempenho do modelo hidrológico LASH na estimativa não só de vazões máximas, como também de vazões médias e mínimas, são apresentados, na Figura 89 para a BHAP-PCF e na Figura 90 para a BHAF-PC, os gráficos ilustrando tais variáveis no intervalo de tempo anual.

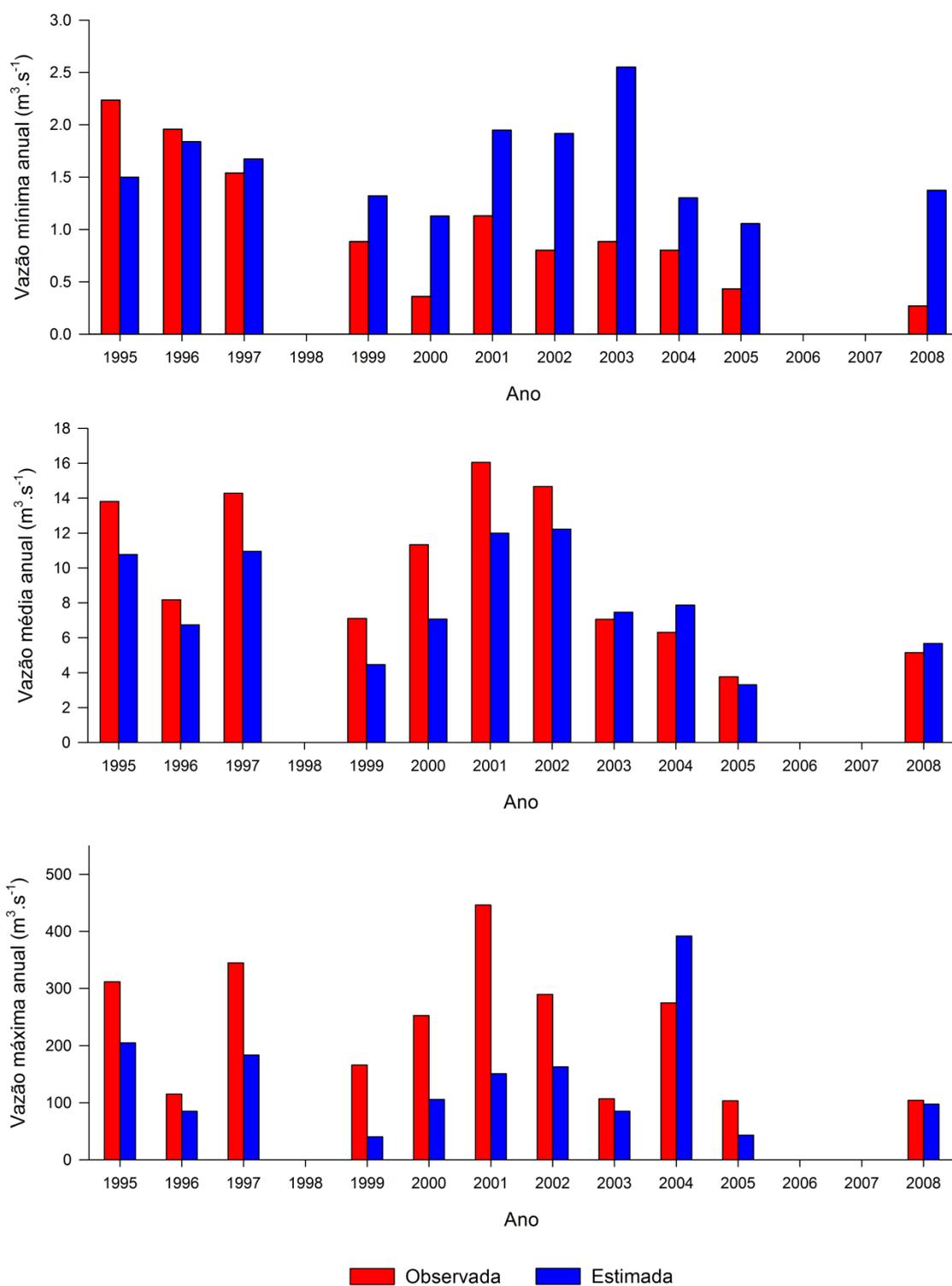


Figura 89 - Vazões mínimas, médias e máximas anuais observadas e estimadas, para a BHAP-PCF, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-1

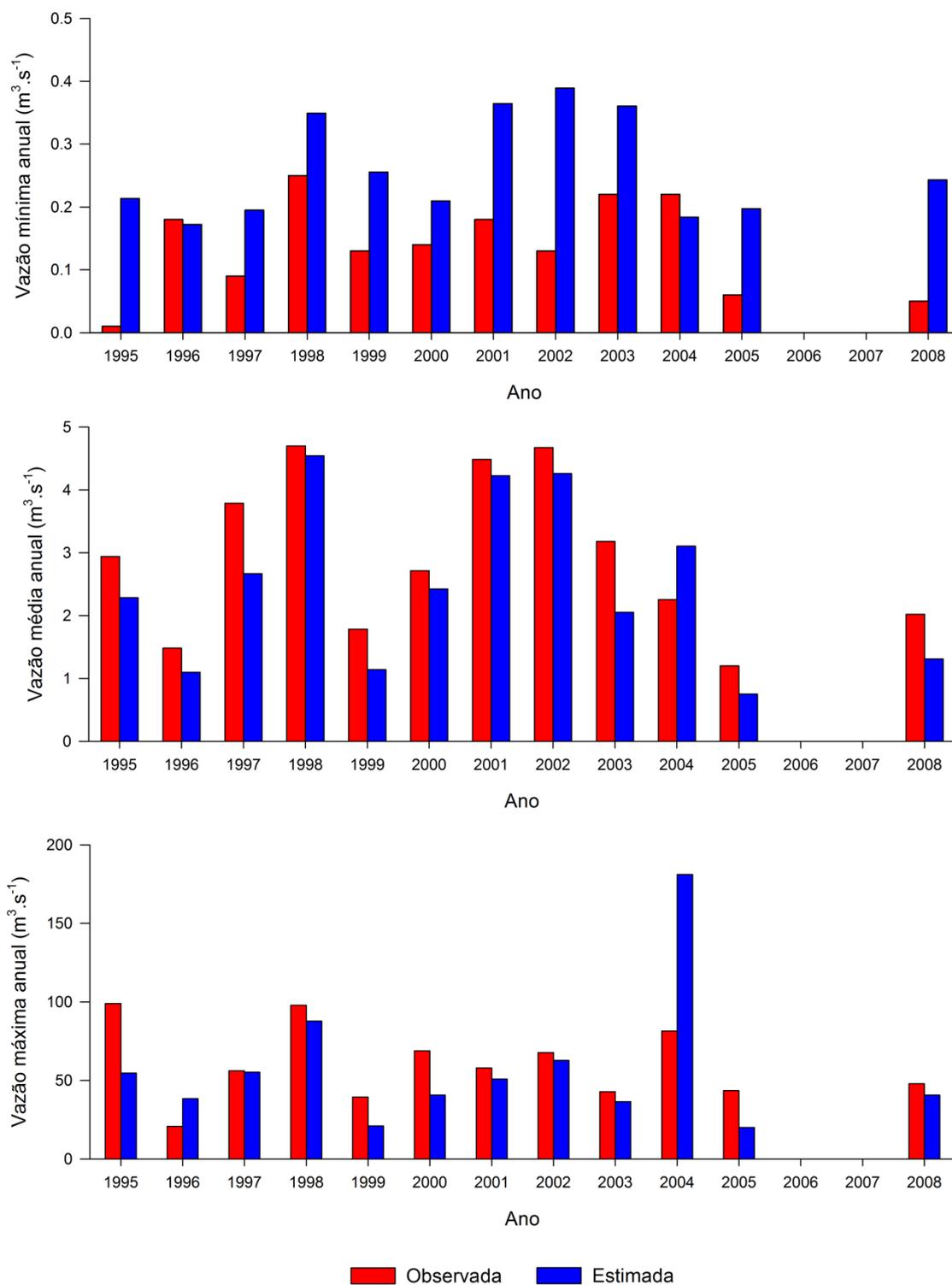


Figura 90 - Vazões mínimas, médias e máximas anuais observadas e estimadas, para a BHAFF-PC, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-1

As Figuras acima apresentadas permitem constatar visualmente que, de maneira geral, o modelo LASH produziu resultados satisfatórios, no entanto, para alguns indicadores anuais analisados, observam-se dificuldades na estimativa.

Viola et al. (2009), Beskow et al. (2013) e Viola et al. (2013), em bacias hidrográficas com características fisiográficas bastante diferenciadas em relação à BHAP-PCF e à BHAF-PC, também avaliaram o modelo LASH frente à estimativa de vazões mínimas, médias e máximas anuais, constatando o bom desempenho do modelo para estes propósitos.

A estimativa de vazões médias é bastante importante para a gestão de recursos hídricos. A vazão média de longo termo, a qual é estimada pela média aritmética de todos os valores que compõem a série de dados observados, é um indicador, comumente associado à disponibilidade hídrica, que representa a quantidade média de água disponível para atender à demanda oriunda das atividades humanas e para a conservação do ecossistema (BESKOW *et al.*, 2015). A partir da vazão média de longo termo, pode-se estimar o rendimento específico – ou produção de água – da bacia, que é a vazão média por área de drenagem, geralmente na unidade de $L.s^{-1}.km^{-2}$.

Em termos de produção de água, os dados médios diários observados apontam para $26,6 L.s^{-1}.km^{-2}$, no caso da BHAP-PCF, e para $23,0 L.s^{-1}.km^{-2}$, no caso da BHAF-PC. Este mesmo indicador, quando obtido com base nas vazões médias diárias estimadas pelo modelo LASH para a BHAP-PCF é de $21,9 L.s^{-1}.km^{-2}$ e para a BHAF-PC, de $19,9 L.s^{-1}.km^{-2}$. Considerando a estatística de análise ΔQ e a classificação proposta por Van Liew, Arnold e Garbrecht (2003), observa-se um ajuste “muito bom” entre o indicador obtido a partir das vazões médias diárias estimadas pelo modelo LASH e aquele obtido através dos dados observados na BHAF-PC, e “bom” para a BHAP-PCF, ocorrendo uma subestimativa de 17,80% no caso da BHAP-PCF e de 13,64% no caso da BHAF-PC.

A estimativa de vazões mínimas fornece subsídio, por exemplo, ao dimensionamento de sistemas de bombeamento para fins de irrigação agrícola, à identificação de susceptibilidade à estiagens e à determinação de vazões outorgáveis. No contexto de vazões outorgáveis, destaca-se a curva de permanência; uma das ferramentas usadas para determinar a disponibilidade de água em uma determinada bacia, fornecendo a frequência com que uma dada vazão é igualada ou excedida, sendo muitas vezes utilizada para determinar valores de referência de vazões mínimas, como a $Q_{90\%}$ e a $Q_{95\%}$, as quais

representam a vazão que é igualada ou excedida em 90% e 95% do tempo, respectivamente (PEREIRA *et al.*, 2016)

A Figura 91 permite visualizar as curvas de permanência de vazões médias diárias observadas e estimadas pelo modelo LASH para a BHAP-PCF, enquanto que para a BHAF-PC, tais curvas são apresentadas na Figura 92.

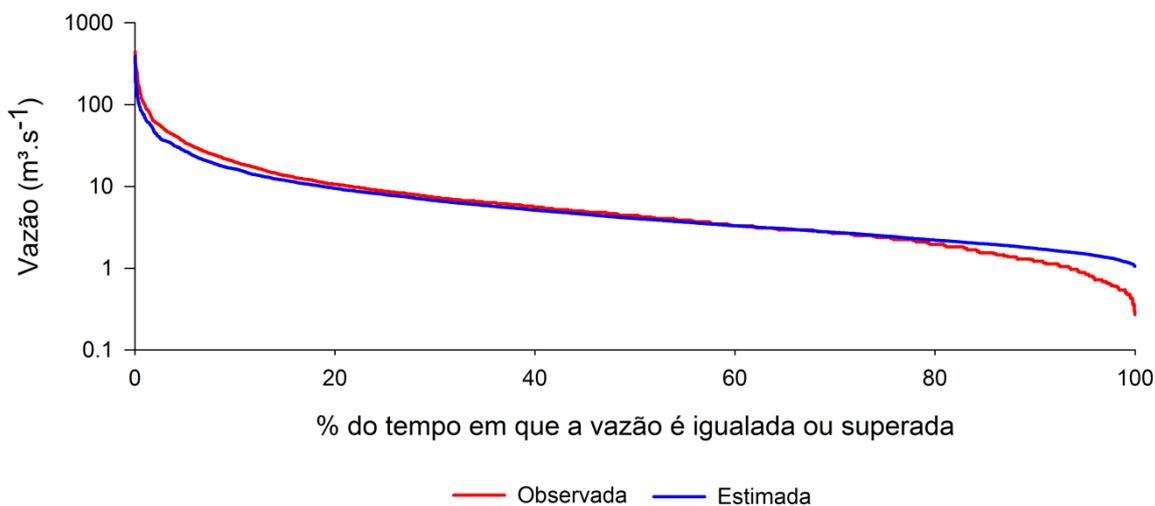


Figura 91 - Curvas de permanência de vazões médias diárias observada e estimada, para a BHAP-PCF, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-1

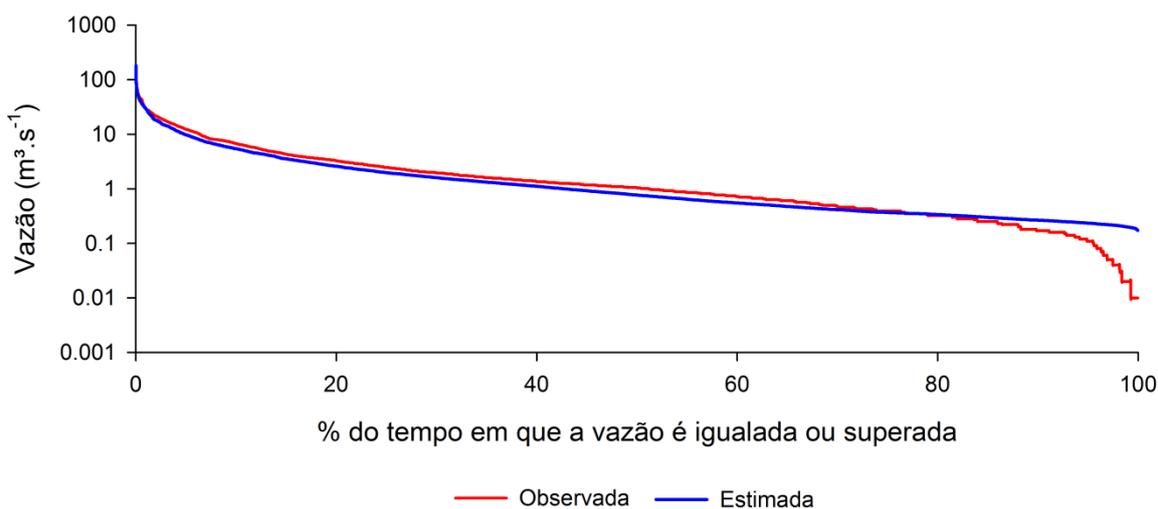


Figura 92 - Curvas de permanência de vazões médias diárias observada e estimada, para a BHAF-PC, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-1

Uma análise visual das curvas de permanência acima apresentadas permite inferir que as vazões estimadas pelo modelo LASH proporcionaram a

obtenção de curva de permanência que, em termos gerais, é condizente com aquela obtida a partir dos dados observados na seção de controle de ambas as bacias. No caso da BHAP-PCF (Figura 91), houve uma pequena subestimativa das vazões até 60% de excedência ($Q_{60\%}$) e, em seguida, uma superestimativa para as vazões são mínimas. Já para a BHAF-PC (Figura 92), o mesmo comportamento é observado, contudo, as vazões passam a ser superestimadas a partir de 70% de excedência.

Na

Tabela 12 pode-se observar as vazões de referência para as permanências de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 95%, além dos valores da estatística ΔQ , os quais permitem avaliar com melhor precisão o ajuste da curva de permanência estimada à observada.

Tabela 12 - Vazões de referência, obtidas a partir das curvas de permanência de vazões médias diárias observa e estimada empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-1, e a medida estatística ΔQ , indicando se houve super ou subestimativa desses indicadores e suas magnitudes

Vazão de referência	BHAP-PCF			BHAF-PC		
	Observada ($m^3.s^{-1}$)	Estimada ($m^3.s^{-1}$)	ΔQ (%)	Observada ($m^3.s^{-1}$)	Estimada ($m^3.s^{-1}$)	ΔQ (%)
$Q_{10\%}$	19,94	16,31	-18,20	6,81	5,41	-20,56
$Q_{20\%}$	10,59	9,46	-10,70	3,27	2,58	-21,01
$Q_{30\%}$	7,30	6,71	-8,14	1,96	1,60	-18,44
$Q_{40\%}$	5,57	5,11	-8,21	1,35	1,11	-17,79
$Q_{50\%}$	4,43	4,05	-8,72	1,05	0,77	-27,11
$Q_{60\%}$	3,31	3,29	-0,36	0,72	0,55	-23,79
$Q_{70\%}$	2,65	2,73	3,05	0,48	0,41	-16,40
$Q_{80\%}$	1,96	2,20	12,18	0,32	0,34	5,41
$Q_{90\%}$	1,21	1,75	44,05	0,17	0,27	56,20
$Q_{95\%}$	0,87	1,49	71,31	0,11	0,23	113,11

Observa-se na Tabela 12, com base nos resultados da estatística ΔQ e na classificação indicada por Van Liew, Arnold e Garbrecht (2003), que as vazões de referência $Q_{30\%}$, $Q_{40\%}$, $Q_{50\%}$, $Q_{60\%}$ e $Q_{70\%}$, para a BHAP-PCF, e $Q_{80\%}$, para a BHAF-PC, apresentaram um ajuste “muito bom”, enquanto que um ajuste “bom” é observado na $Q_{20\%}$ e na $Q_{80\%}$, para a BHAP-PCF, “satisfatório” na vazões de referência $Q_{10\%}$, para a BHAP-PCF, e $Q_{10\%}$, $Q_{20\%}$, $Q_{30\%}$, $Q_{40\%}$, $Q_{60\%}$ e $Q_{70\%}$, para a BHAF-PC. Um ajuste inadequado, segundo a classificação de Van Liew, Arnold e

Garbrecht (2003), é observado nas vazões de referência $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$, no caso da BHAP-PCF, e $Q_{50\%}$, $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$, no caso da BHAF-PC, pois os valores da estatísticas superam 25%.

O modelo hidrológico LASH tem sido avaliado na região sudeste do Brasil no tocante à precisão na geração da curva de permanência, como observa-se nos estudos de Viola *et al.* (2009), Beskow *et al.* (2013) e Viola *et al.* (2013), os quais também constataram uma precisão aceitável do modelo LASH para estimativa da importante função hidrológica.

É de extrema importância que um modelo hidrológico, considerando medidas estatísticas apropriadas, apresente desempenho satisfatório, atrelando confiabilidade aos resultados obtidos para uma bacia hidrográfica. Todavia, tão importante quanto apresentar um desempenho geral aceitável, destacam Beskow *et al.* (2011), é o fato de estimar e entender o comportamento dos diferentes componentes do escoamento superficial na bacia.

Na Figura 93 e na Figura 94 são apresentadas as sínteses dos resultados gerados pelo modelo LASH para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC, respectivamente, no tocante aos diferentes componentes do escoamento superficial, além do pluviograma de precipitação total anual, o qual permite melhor compreender os resultados obtidos.

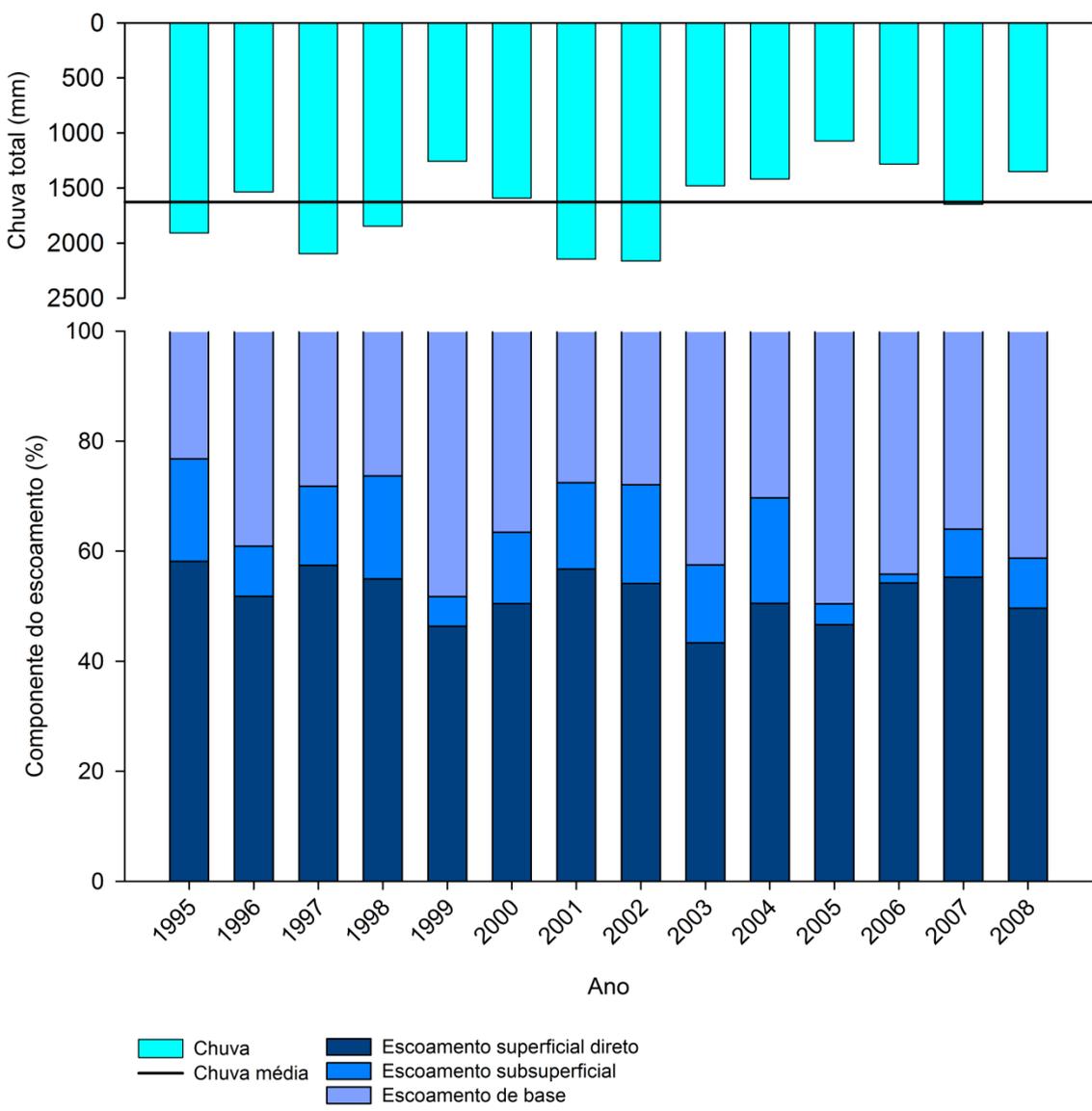


Figura 93 - Divisão percentual dos componentes do escoamento – escoamento de base, subsuperficial e superficial – ao longo dos anos empregados para calibração e validação, considerando as vazões médias diárias estimadas, para a BHAP-PCF, a partir da terceira versão do modelo LASH e da EC-1

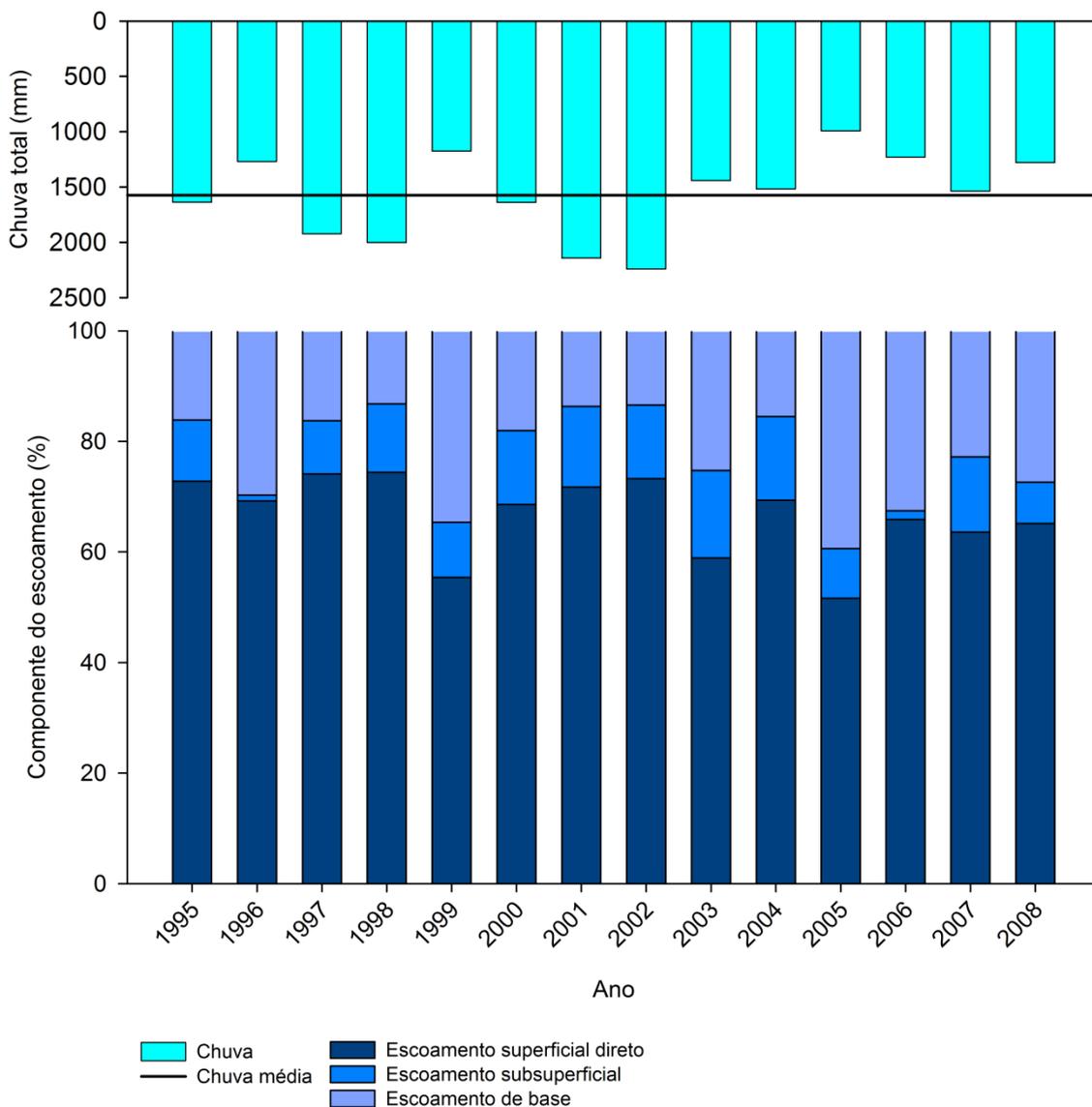


Figura 94 - Divisão percentual dos componentes do escoamento – escoamento de base, subsuperficial e superficial – ao longo dos anos empregados para calibração e validação, considerando as vazões médias diárias estimadas, para a BHAF-PC, a partir da terceira versão do modelo LASH e da EC-1

Pode-se observar (Figura 93 e Figura 94) que, de uma forma geral, as bacias hidrográficas analisadas tiveram predominância de escoamento superficial direto aos longos dos anos, sendo que este corresponde, em média, a 52,12% do escoamento total estimado para a BHAF-PCF, e a 66,71% para a BHAF-PC. Os escoamentos de base e subsuperficial representam, em média, 35,78 e 12,10%, para a BHAF-PCF, e 22,73 e 10,56% para a BHAF-C, respectivamente.

A tendência de superioridade do escoamento superficial direto só não é verificada na BHAF-PCF (Figura 93) nos anos de 1999, 2003 e 2005, para os

quais a precipitação total anual ficou abaixo da média observada entre os anos de 1995 e 2008. Nos anos de 1996, 2000, 2004, 2006 e 2008 também foram observadas precipitações totais anuais inferiores à média, contudo, a parcela de escoamento superficial direto nos referidos períodos apresentou superioridade, embora não muito pronunciada, quando comparada ao escoamento de base.

No caso da BHAF-PC, todos os anos analisados (Figura 94) apresentaram superioridade do escoamento superficial direto em relação ao escoamento de base e subsuperficial. Nos anos de 1996, 1999, 2003, 2005, 2006, 2007 e 2008 observam-se parcelas de escoamento de base superiores em relação aos demais períodos analisados, podendo este fato ser atribuído às precipitações totais anuais, as quais foram inferiores à média observada.

O grande potencial para a geração de escoamento superficial direto constatado neste estudo para a BHAF-PC, especialmente, está associada a uma combinação entre baixa condutividade hidráulica do solo saturado (K_{SAT}), predominância do cultivo de pastagem e o tipo de chuva predominantemente frontal, corroborando com os resultados obtidos por Beskow *et al.* (2016) quando da aplicação da segunda versão do LASH para a referida bacia, e com as constatações de Viola *et al.* (2013). No caso da BHAF-PCF, cujo potencial para geração de escoamento superficial direto é abaixo da média, pode-se verificar índices próximos àqueles obtidos para a BHAF-PC, pois, embora a K_{SAT} seja notoriamente superior, os solos são pouco profundos, o cultivo predominante é a pastagem e o tipo de chuva, frontal, contribuindo para sua geração.

É importante ressaltar a parcela significativa de escoamento subsuperficial em ambas as bacias analisadas (12,10% para a BHAF-PCF e 10,56% para a BHAF-PC, em média). De acordo com Beskow *et al.* (2011b), o escoamento subsuperficial pode ser insignificante em muitas bacias hidrográficas, mas, por outro lado, pode ser fundamental quando da avaliação de bacias florestadas ou bacias de cabeceira. Os resultados encontrados para este componente de escoamento corroboram com as conclusões de Beskow *et al.* (2011b), visto que a BHAF-PCF e a BHAF-PC têm aproximadamente 21 e 29% de área florestada (nativa + plantada), respectivamente.

Os resultados encontrados neste estudo, para a BHAF-PC, a respeito de percentuais de componentes de escoamento são bastante contrastantes com

aqueles encontrados por Beskow et al. (2011b) e Viola et al. (2013) também aplicando o modelo hidrológico LASH, enquanto que para a BHAP-PCF, são similares. Estes pesquisadores detectaram uma maior importância para o escoamento de base, podendo este fato ser atribuído aos tipos de solos e às classes de uso do solo das bacias hidrográficas analisadas. Os resultados encontrados na BHAF-PC, aliados com aqueles obtidos em outras regiões do Brasil, também com o modelo LASH, reforçam a necessidade e importância da análise do referido modelo em diferentes regiões fisiográficas e pedoclimáticas do país.

Outra análise interessante concerne aos dados no intervalo de tempo mensal, os quais são comumente empregados por projetistas para diversas finalidades, como, por exemplo, o dimensionamento hidrológico de reservatórios. Neste sentido, a Figura 95 apresenta, para a BHAP-PCF, os hidrogramas de vazão média mensal observados e estimados, a partir da terceira versão do modelo LASH e da EC-1, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), além do pluviograma total médio da bacia. Para a BHAF-PC, estes podem ser visualizados na Figura 96.

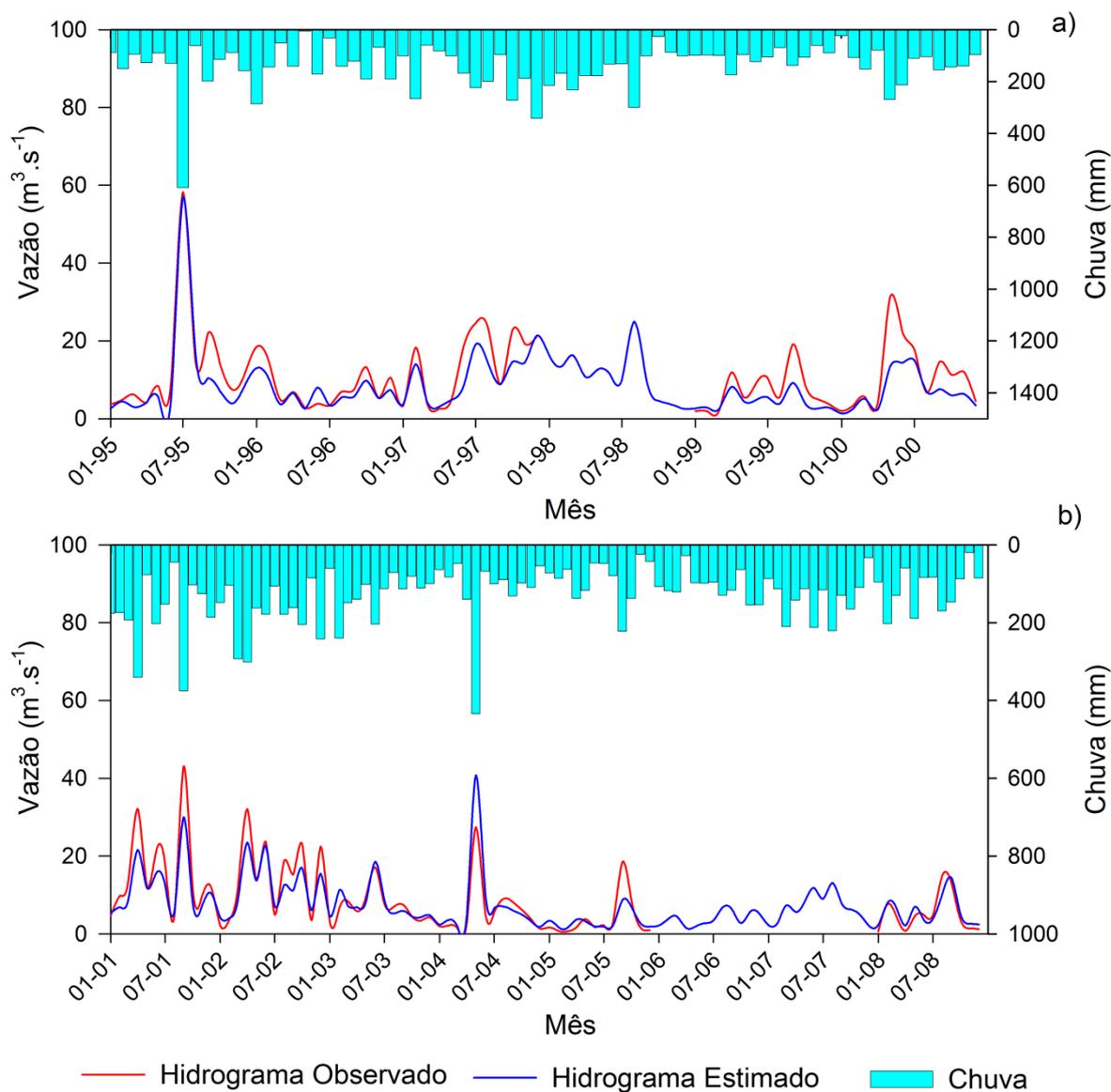


Figura 95 - Pluviogramas médios observados na BHAP-PCF, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-1 e o intervalo de tempo mensal

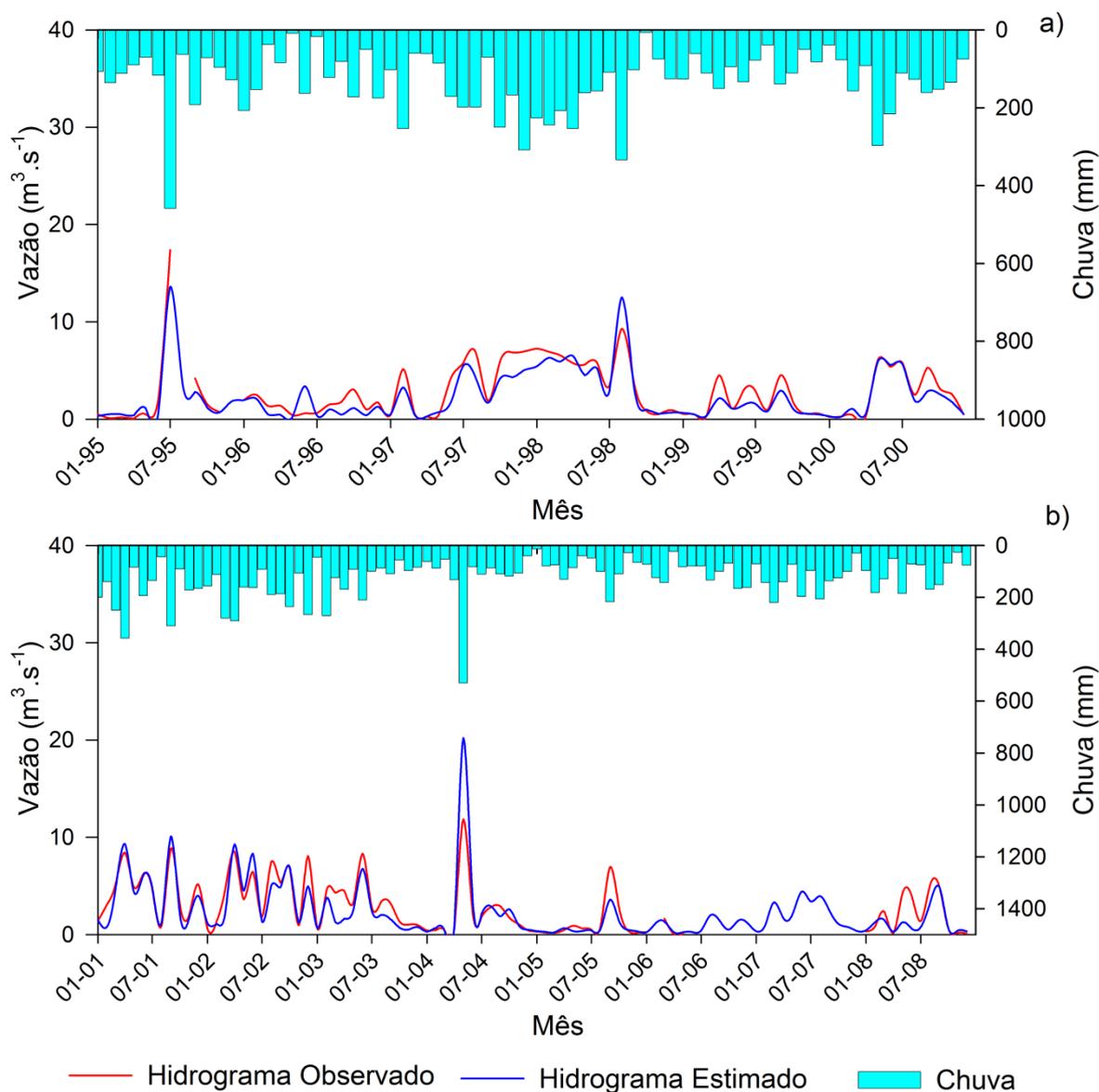


Figura 96 - Pluviogramas médios observados na BHAF-PC, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-1 e o intervalo de tempo mensal

Observa-se que as vazões médias mensais, obtidas a partir de dados de vazões médias diárias estimadas pelo modelo LASH, são, de forma geral, condizentes com o comportamento observado nas duas bacias. Para estes hidrogramas, tem-se as estatísticas de precisão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Medidas estatísticas para avaliação do desempenho da terceira versão do modelo hidrológico LASH frente aos períodos de calibração e validação, para uma análise de vazões médias mensais, obtidas através da EC-1

Medida estatística	BHAP-PCF		BHAF-PC	
	Calibração	Validação	Calibração	Validação
C_{NS}	0,74	0,80	0,83	0,68
$C_{NS} \log(Q)$	0,69	0,82	0,75	0,81
RMSE	4,77	3,84	1,21	1,52
ΔQ (%)	-10,00	-6,84	-18,32	-11,72

Pode-se verificar, com base nos resultados apresentados na Tabela 13 e na classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007), que, em termos de C_{NS} e $C_{NS} \log(Q)$, o ajuste do hidrograma médio mensal estimado ao hidrograma médio mensal observado foi “muito bom”, tanto para os períodos de calibração quanto de validação, nas duas bacias. Já a estatística ΔQ e a classificação de Van Liew, Arnold e Garbrecht (2003) indicam um ajuste “muito bom” apenas para o período de validação para a BHAP-PCF, tendo o período de calibração para a referida bacia e o período de validação para a BHAF-PC apresentado ajuste “bom” e o período de calibração para a BHAF-PC, apresentado ajuste “satisfatório”.

3.3. Análise da precisão do modelo pela EC-2

A Figura 97 e a Figura 98 ilustram os hidrogramas observados e estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-2, considerando separadamente os períodos de calibração e de validação, para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC, respectivamente.

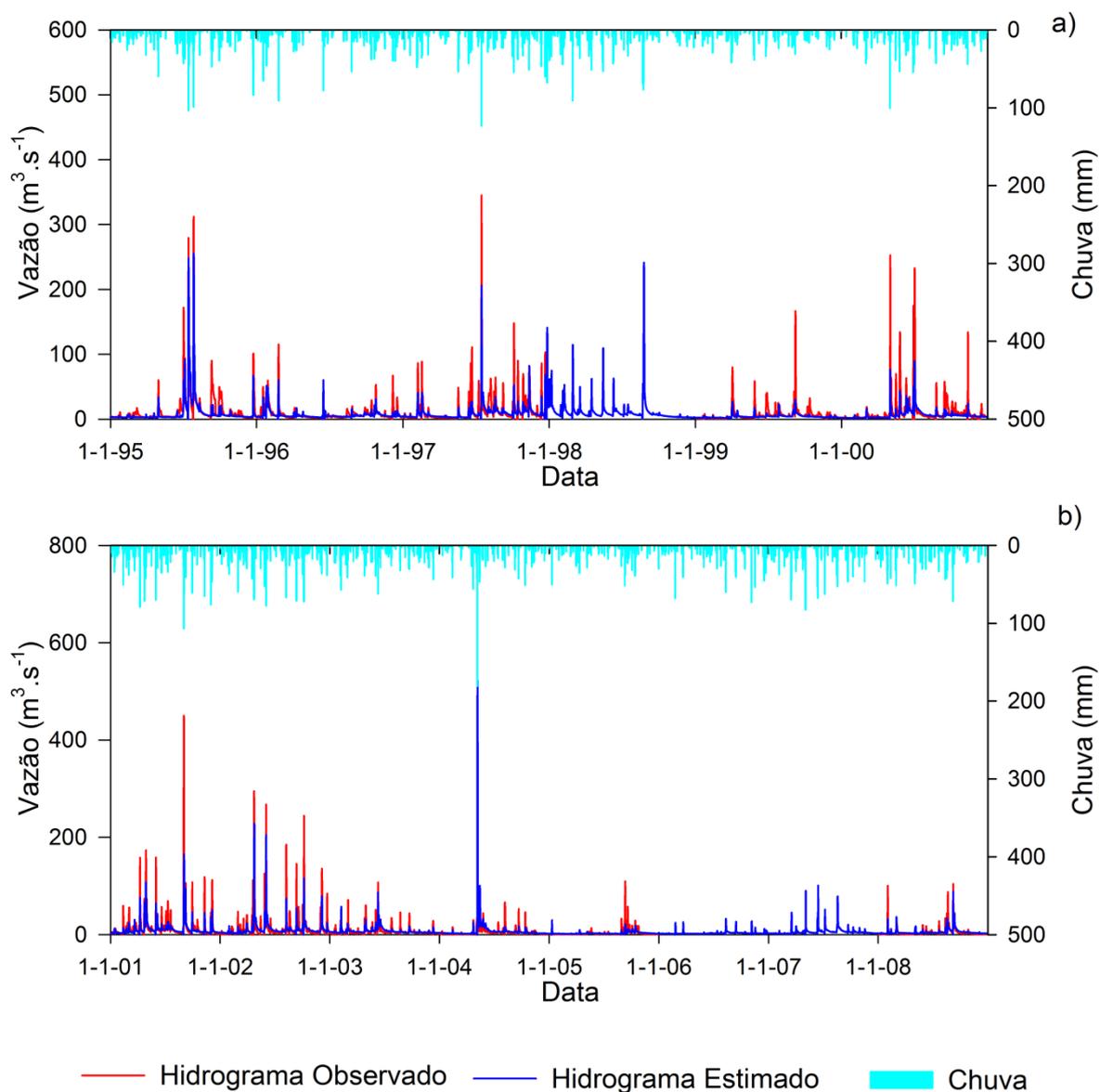


Figura 97 - Pluviogramas médios observados na BHAP-PCF, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-2 e o intervalo de tempo diário

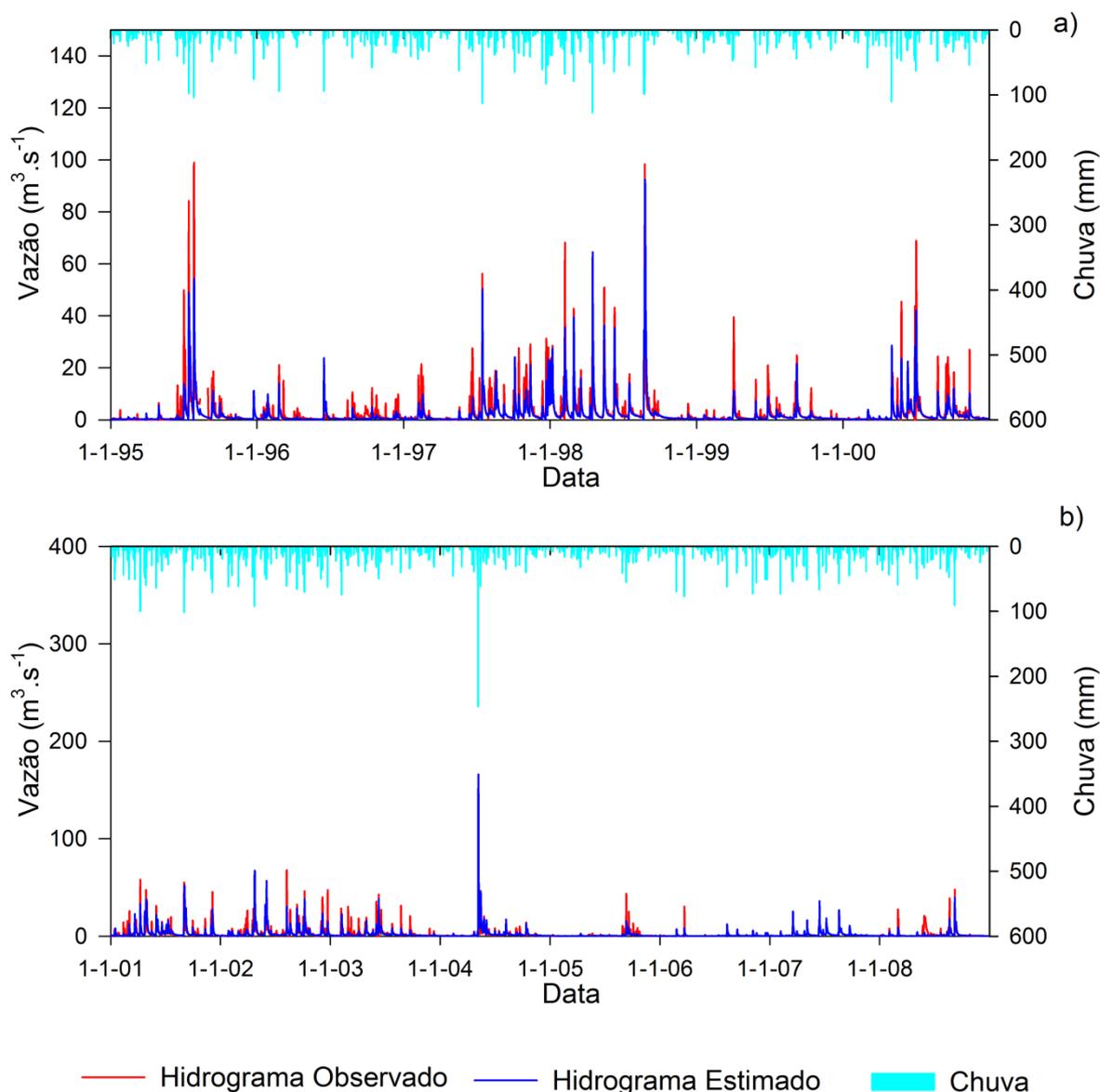


Figura 98 – Pluviogramas médios observados na BHAF-PC, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-2 e o intervalo de tempo diário

Pela análise visual dos hidrogramas estimados através da EC-2, apresentados na Figura 97 e na Figura 98, pode-se constatar que o modelo LASH foi capaz de capturar o comportamento geral dos hidrogramas observados, assim como no caso dos hidrogramas estimados pela EC-1 (Figura 87 e Figura 88)

As análises estatísticas referentes ao desempenho da terceira versão do modelo LASH atrelada a EC-2, para os períodos de calibração e de validação, pode ser visualizada na Tabela 14.

Tabela 14 - Medidas estatísticas para avaliação do desempenho da terceira versão do modelo hidrológico LASH frente aos períodos de calibração e validação, para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC, obtidas através da EC-2

Medida estatística	BHAP-PCF		BHAF-PC	
	Calibração	Validação	Calibração	Validação
C_{NS}	0,60	0,61	0,71	0,53
$C_{NS} \log(Q)$	0,61	0,61	0,68	0,76
RMSE	13,65	13,51	3,56	4,13
ΔQ (%)	-29,70	-10,08	-21,77	-14,75

Considerando os valores apresentados na Tabela 14 e a classificação proposta por Zappa (2002) para o C_{NS} , a terceira versão do LASH pode ser utilizada para modelagem hidrológica nas duas bacias analisadas, haja vista que esta medida estatística apresentou valores superiores a 0,5, tanto nos períodos de calibração quanto de validação. Já a classificação indicada por Gottschalk e Motovilov (2000) aponta que o ajuste dos hidrogramas estimados aos hidrogramas observados é “aceitável”, e a classificação de Moriasi *et al.* (2007), a qual é mais restritiva, permite concluir que o ajuste foi “bom” para os períodos de calibração e de validação para a BHAP-PCF, “muito bom” para o período de validação para a BHAF-PC e “satisfatório” para seu período de validação.

Para a medida estatística $C_{NS} \log(Q)$, os valores obtidos (Tabela 14), permitem constatar, pela classificação de Zappa (2002), que a terceira versão do modelo LASH pode ser empregada em ambas as bacias analisadas. Com relação a classificação de Gottschalk e Motovilov (2000), esta indica um ajuste “aceitável” para os períodos de calibração e validação do modelo para a BHAP-PCF e de calibração para a BHAF-PC, e “bom e adequado” para o período de validação para a BHAF-PC, enquanto que a classificação de Moriasi *et al.* (2007) aponta para um ajuste “bom”, no caso da BHAP-PCF, e “muito bom”, no caso da BHAF-PC.

Já os valores de ΔQ (Tabela 14), quando analisados considerando a classificação de Van Liew, Arnold e Garbrecht (2003), indicam um ajuste “bom” para o período de validação, tanto da BHAP-PCF quanto da BHAF-PC, “satisfatório”, no caso do período de calibração da BHAF-PC, e “inadequado” para o período de calibração da BHAP-PCF.

As classificações sugeridas por Zappa (2002), Gottschalk e Motovilov (2000) e Moriasi *et al.* (2007), empregadas para as medidas estatísticas C_{NS} e $C_{NS} \log(Q)$, e de Van Liew, Arnold e Garbrecht (2003), para ΔQ , indicam que, de uma forma geral, o ajuste do hidrograma estimado pela terceira versão do modelo LASH e a EC-2 ao hidrograma observado, em ambas as bacias hidrográficas, foi satisfatório.

Contudo, se comparadas as estatísticas obtidas pela EC-1 (Tabela 11) e pela EC-2 (Tabela 14), pode-se verificar que, para a BHAP-PCF, o ajuste do hidrograma estimado ao observado, tanto na calibração quanto na validação, foi melhor pela EC-1, haja vista a maior acurácia obtida para todas as medidas estatísticas empregadas. No caso da BHAF-PC, os valores de C_{NS} , RMSE e ΔQ apontam para um ajuste mais acurado pela EC-1, enquanto que os valores de $C_{NS} \log(Q)$, pela EC-2, indicando que esta tendeu a estimar de forma mais satisfatória as vazões de estiagem para a bacia.

Esta constatação ressalta o que foi verificado nas Figura 83, Figura 84, Figura 85 e Figura 86, as quais permitem identificar claramente que, para a BHAF-PC, tanto a EC-1 quanto a EC-2 apresentam convergência dos parâmetros de calibração, enquanto que para a BHAP-PCF, não houve padrão de convergência pela EC-2. Esta diferença no comportamento da EC-2 para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC, quanto a convergência dos parâmetros, pode ser parcialmente atribuída à diferença no número de parâmetros calibrados, uma vez que, na BHAF-PC, estes somaram 29 (6 parâmetros concentrados e 1 parâmetro distribuído em 23 sub-bacias), enquanto que na BHAP-PCF, somaram 49 (6 parâmetros concentrados e 1 parâmetro distribuído em 43 sub-bacias).

Com relação à estimativa de vazões máximas, médias e mínimas anuais, a Figura 99 e a Figura 100 apresentam, para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC, respectivamente, estes indicadores comparados aos observados nas seções de controle.

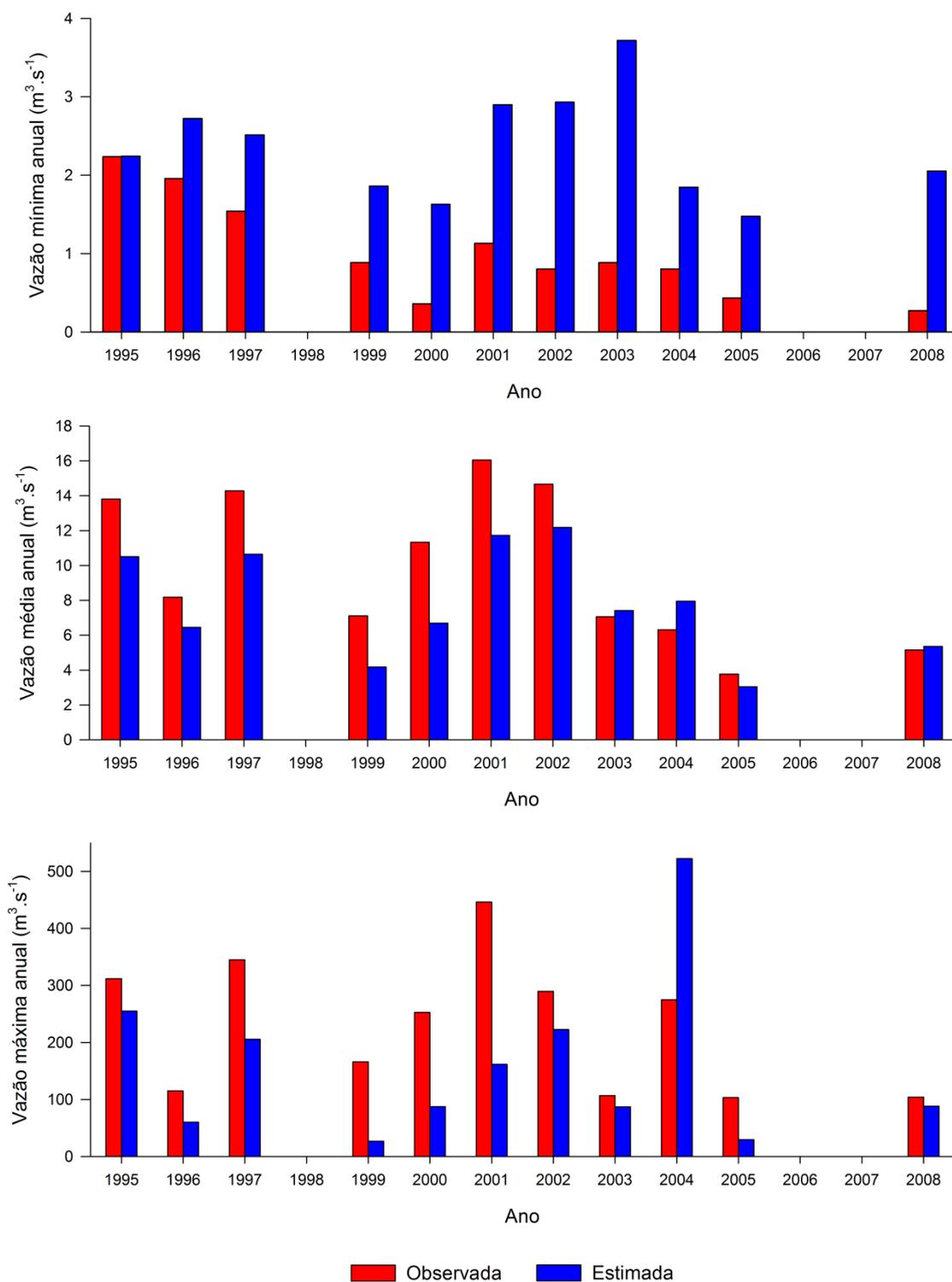


Figura 99 - Vazões mínimas, médias e máximas anuais observadas e estimadas, para a BHAP-PCF, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-2

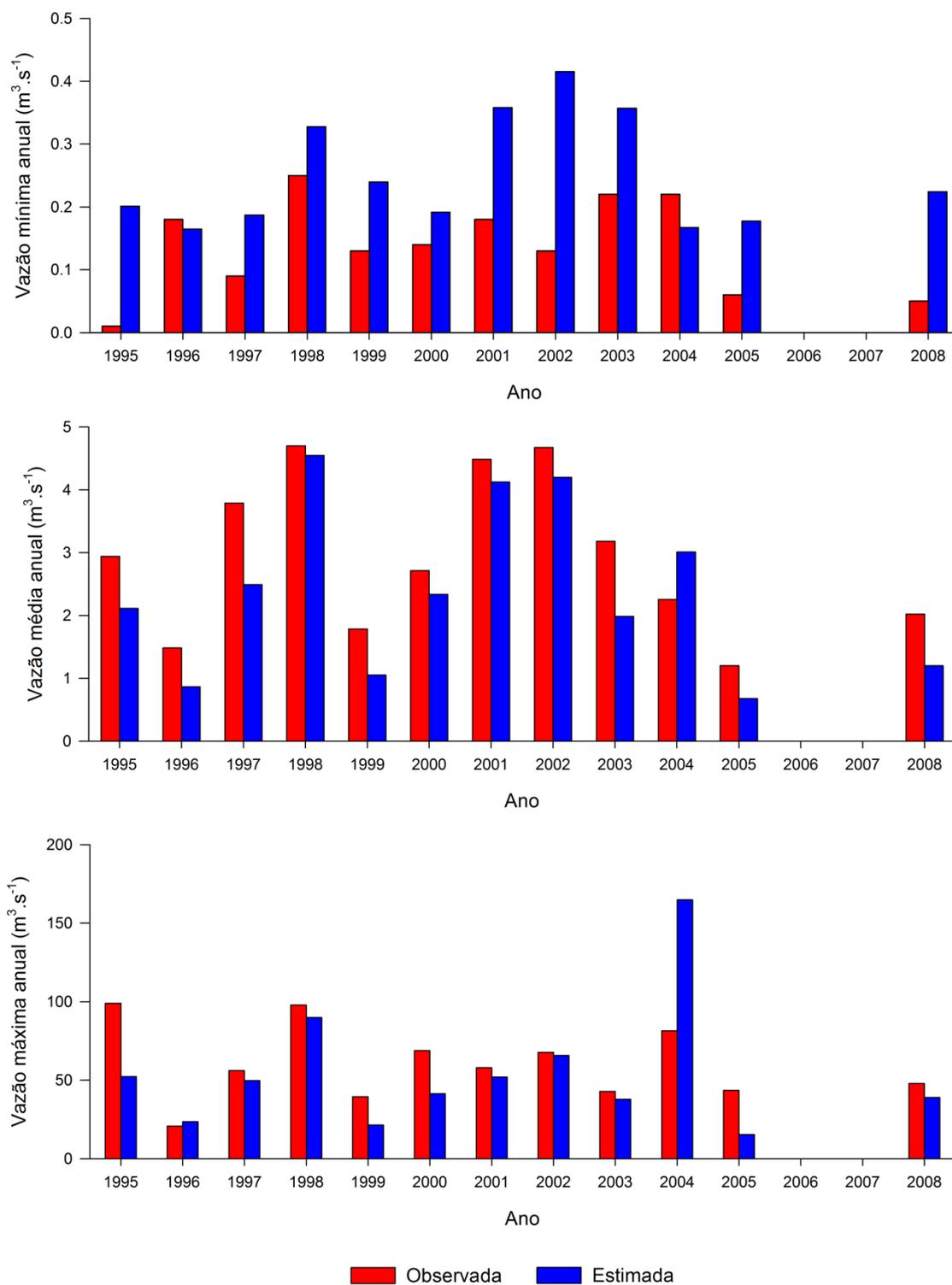


Figura 100 - Vazões mínimas, médias e máximas anuais observadas e estimadas, para a BHAF-PC, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-2

Pode-se observar que, para a BHAF-PCF (Figura 99), as vazões mínimas anuais estimadas pela terceira versão do modelo LASH através da EC-2 foram

sempre superestimadas quando comparadas aos valores observados. Já as vazões médias e as vazões máximas apresentaram comportamento semelhante; foram subestimadas na maioria dos anos analisados. Para a BHAF-PC, tanto as vazões mínimas quanto as vazões médias e máximas foram subestimadas, na maioria dos casos, quando comparadas aos dados observados.

Quando analisa-se a influência da estratégia de calibração na estimativa dos indicadores anuais acima apresentados, através da comparação entre os valores de ΔQ entre dados observados e estimados pela EC-1 e pela EC-2, pode-se verificar o cenário ilustrado na Figura 101; em termos de vazões mínimas e médias, a calibração concentrada de sete parâmetros (EC-1) proporcionou, na maioria dos anos analisados, resultados mais próximos dos dados observados, tendo apresentado desempenho substancialmente superior à calibração concentrada de 6 parâmetros e distribuída do parâmetro λ (EC-2), enquanto que para vazões máximas, o desempenho de ambas as estratégias foi semelhante.

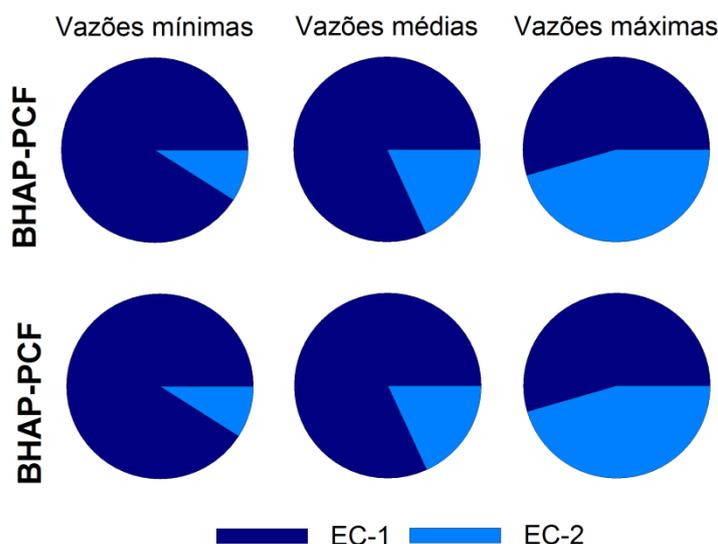


Figura 101 - Desempenho das estratégias de calibração EC-1 e EC-2 na estimativa de indicadores anuais na BHAP-PCF e na BHAF-PC, através da análise da estatística ΔQ entre dados observados e estimados

Em termos de produção de água, as vazões médias diárias estimadas pelo modelo LASH através da EC-2 indicaram $21,3 \text{ L.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ para a BHAP-PCF e $19,1 \text{ L.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ para a BHAF-PC. Frente aos mesmos indicadores estimados a partir dos dados observados – $26,6 \text{ L.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ para a BHAP-PCF e $23,0 \text{ L.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ para

a BHAF-PC – verifica-se uma subestimativa de cerca de 20% no primeiro caso e de cerca de 17% no segundo, o que pode ser considerado “bom” segundo classificação de Van Liew, Arnold e Garbrecht (2003). Os valores obtidos para este indicador, através da calibração do modelo LASH pela EC-2, foram ligeiramente inferiores àqueles obtidos pela calibração através da EC-1, indicando um ajuste mais acurado quando todos os parâmetros foram calibrados de forma concentrada.

No que concerne à estimativa de vazões de referência, as curvas de permanência observada e estimada podem ser visualizadas na Figura 102, para a BHAP-PCF, e na Figura 103, para a BHAF-PC.

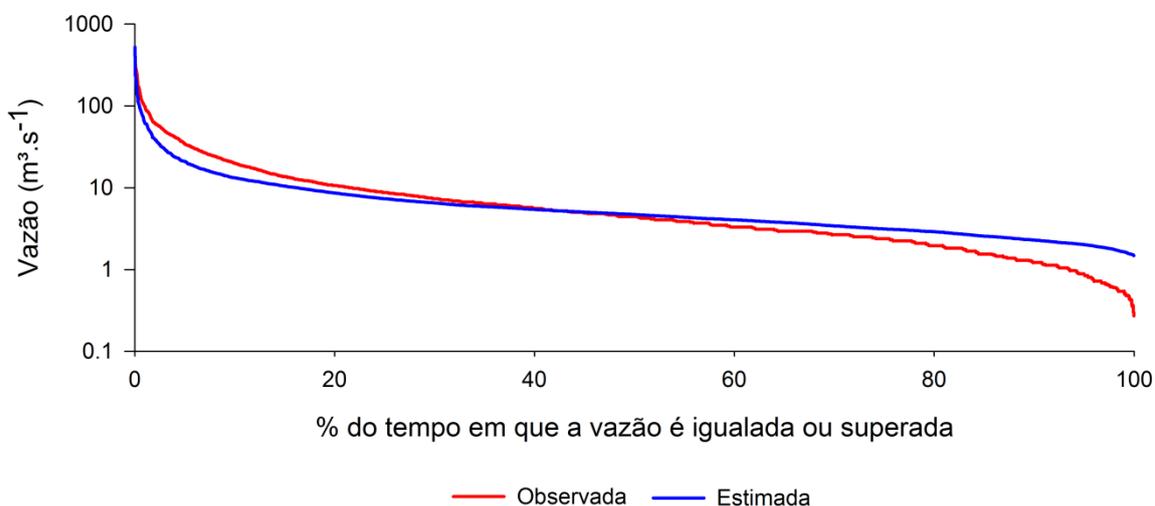


Figura 102 - Curvas de permanência de vazões médias diárias observada e estimada, para a BHAP-PCF, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-2

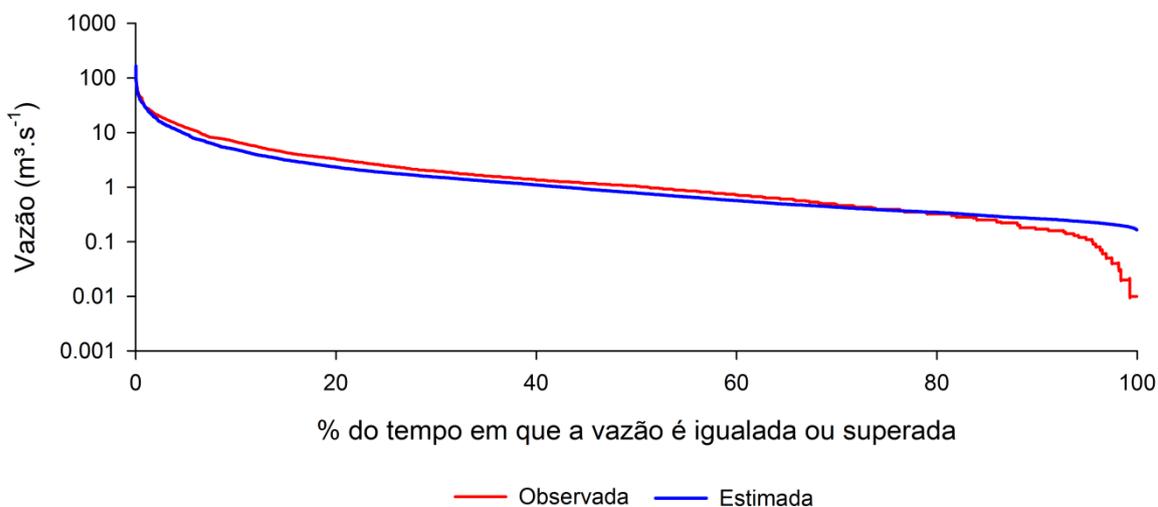


Figura 103 - Curvas de permanência de vazões médias diárias observada e estimada, para a BHAF-PC, empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-2

As vazões estimadas pelo modelo LASH proporcionaram a obtenção de curva de permanência que, em termos gerais, é condizente com aquela obtida a partir dos dados observados em ambas as bacias, ocorrendo subestimativa das vazões até 40 e 70% de excedência para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC, respectivamente, e, em seguida, uma superestimativa, a qual é mais pronunciada no extremo direito do gráfico, onde as vazões são mínimas. Verifica-se ainda que um comportamento bastante semelhante àquele obtido pela calibração do modelo LASH empregando a EC-1, contudo, uma comparação visual entre as curvas de permanência (Figura 91, Figura 92, Figura 102 e Figura 103) permite constatar que, de modo geral, a primeira estratégia (EC-1) permitiu estimar valores mais próximos daqueles observados, principalmente para a BHAP-PCF.

Esta constatação visual é confirmada quando se analisam as vazões de referência para as permanências de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 95% e os valores da estatística ΔQ , apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Vazões de referência, obtidas a partir das curvas de permanência de vazões médias diárias observada e estimada empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH e a EC-2, e a medida estatística ΔQ , indicando se houve super ou subestimativa desses indicadores e suas magnitudes

Vazão de referência	BHAP-PCF			BHAF-PC		
	Observada (m ³ .s-1)	Estimada (m ³ .s-1)	ΔQ (%)	Observada (m ³ .s-1)	Estimada (m ³ .s-1)	ΔQ (%)
Q _{10%}	19,94	13,21	-33,77	6,81	4,87	-28,44
Q _{20%}	10,59	8,59	-18,85	3,27	2,33	-28,88
Q _{30%}	7,30	6,50	-11,03	1,96	1,52	-22,26
Q _{40%}	5,57	5,42	-2,68	1,35	1,10	-18,74
Q _{50%}	4,43	4,70	6,11	1,05	0,78	-25,36
Q _{60%}	3,31	4,05	22,38	0,72	0,56	-21,54
Q _{70%}	2,65	3,41	28,68	0,48	0,43	-12,15
Q _{80%}	1,96	2,89	47,79	0,32	0,35	7,91
Q _{90%}	1,21	2,29	88,83	0,17	0,26	55,48
Q _{95%}	0,87	2,01	131,34	0,11	0,23	109,50

Baseando-se na classificação de Van Liew, Arnold e Garbrecht (2003) para a estatística ΔQ , verifica-se, para a BHAP-PCF, um ajuste “muito bom” para as vazões de referência Q_{40%} e Q_{50%}, “bom” para a Q_{30%}, “satisfatório” para a Q_{20%} e para a Q_{60%}. E “inadequado” para Q_{10%}, Q_{70%}, Q_{80%}, Q_{90%} e Q_{95%}. Já para a

BHAF-PC, o ajuste pode ser considerado “muito bom” para a $Q_{80\%}$, “bom” para a $Q_{70\%}$, “satisfatório” para a $Q_{30\%}$, $Q_{40\%}$ e $Q_{70\%}$ e “inadequado” para $Q_{10\%}$, $Q_{20\%}$, $Q_{50\%}$, $Q_{90\%}$, $Q_{95\%}$.

Em uma análise comparativa entre os valores da estatística ΔQ para as curvas de permanência estimadas através da EC-1 (Tabela 12) e da EC-2 (Tabela 15), constata-se que a segunda estratégia (EC-2) apresentou ajuste mais próximo à vazão de referência observada, quando comparada à EC-1, apenas para as permanências de 40 e de 50%, no caso da BHAF-PCF, enquanto que para a BHAF-PC, o ajuste foi ligeiramente mais acurado até a permanência de 50%.

No tocante ao comportamento dos diferentes componentes do escoamento superficial – os escoamentos superficial direto, subsuperficial e de base – este pode ser visualizado na Figura 104, para a BHAF-PCF, e na Figura 105, para a BHAF-PC.

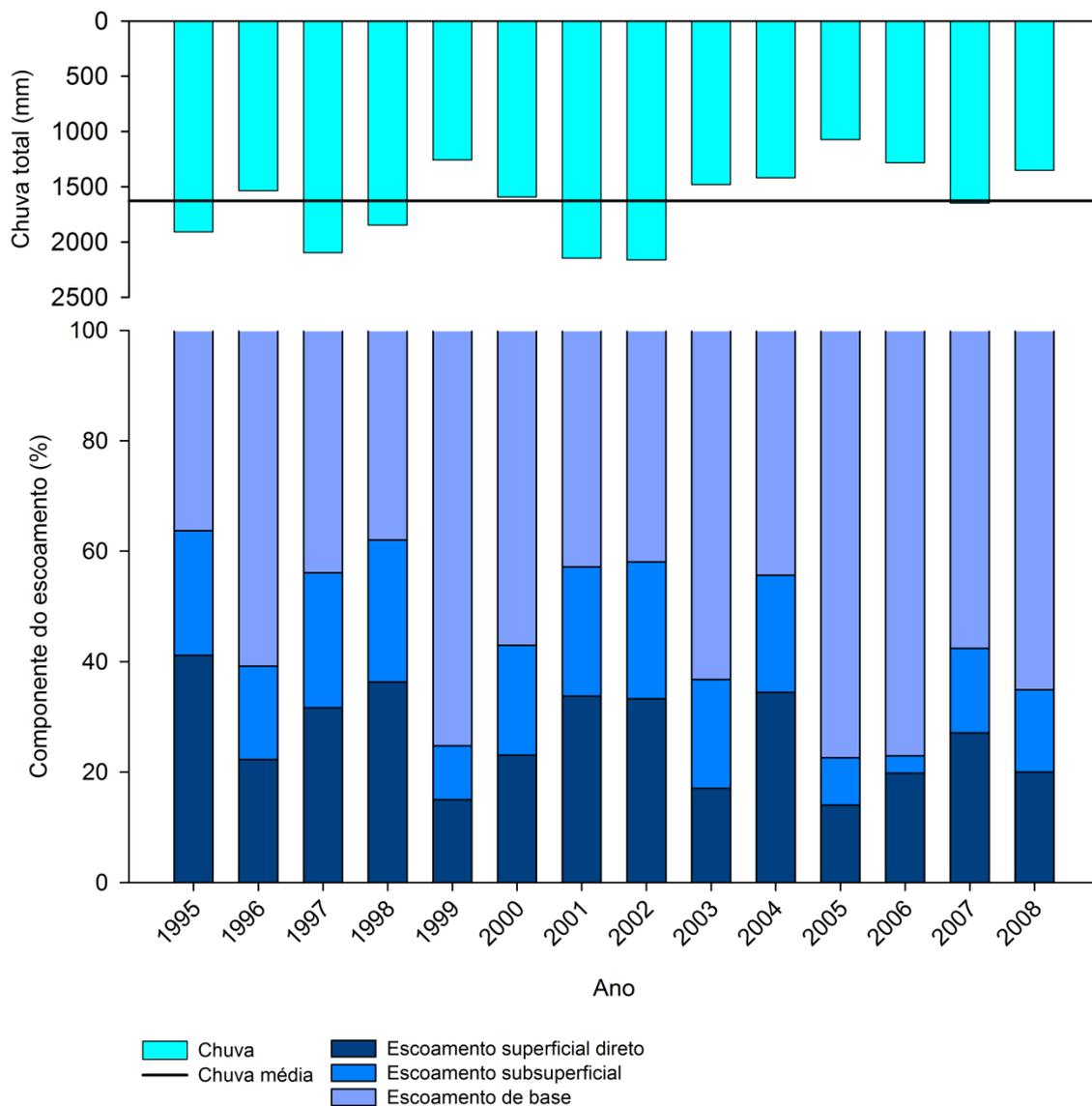


Figura 104 - Divisão percentual dos componentes do escoamento – escoamento de base, subsuperficial e superficial – ao longo dos anos empregados para calibração e validação, considerando as vazões médias diárias estimadas, para a BHAP-PCF, a partir da terceira versão do modelo LASH e da EC-2

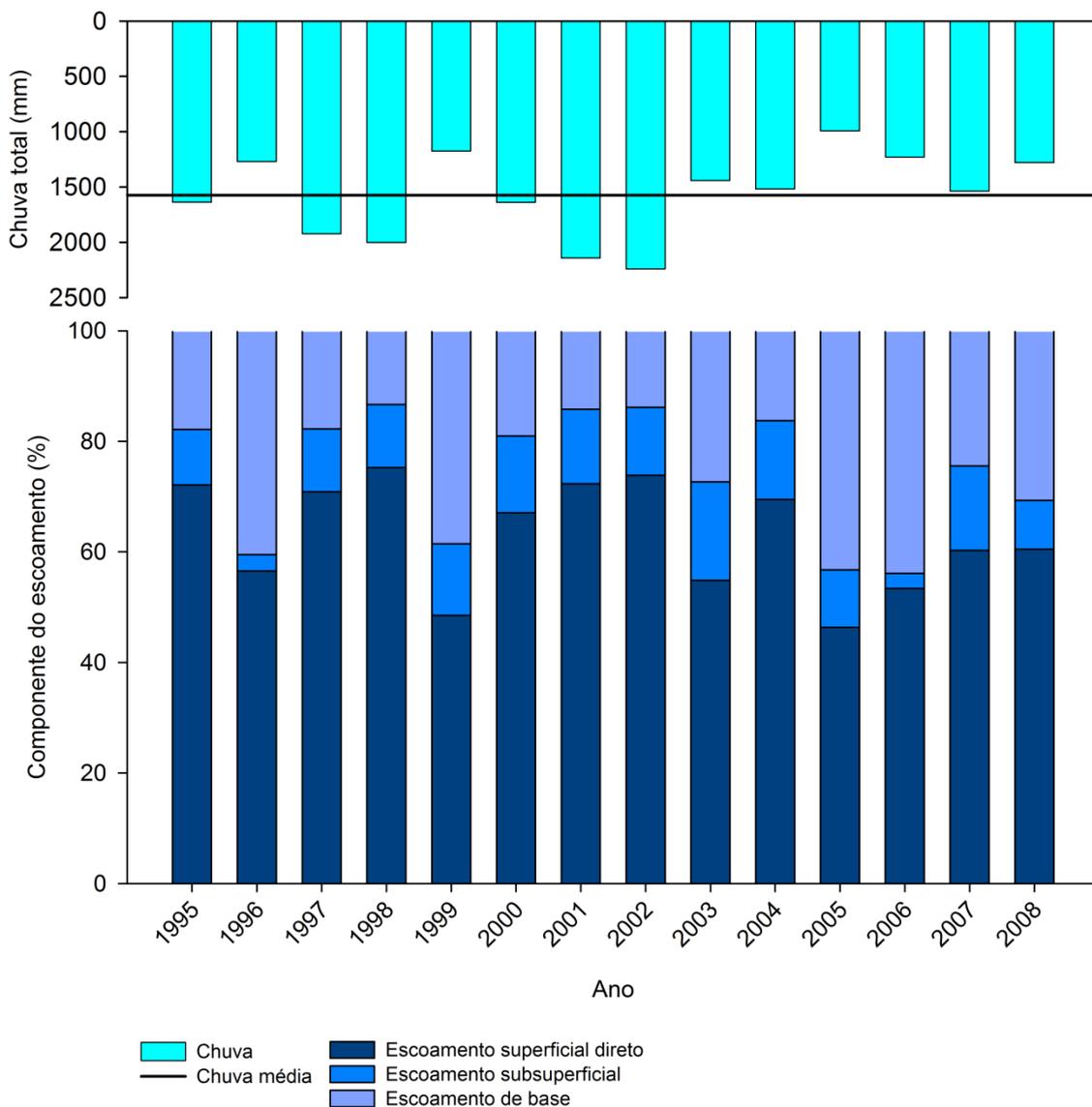


Figura 105 - Divisão percentual dos componentes do escoamento – escoamento de base, subsuperficial e superficial – ao longo dos anos empregados para calibração e validação, considerando as vazões médias diárias estimadas, para a BHAF-PC, a partir da terceira versão do modelo LASH e da EC-2

Analisando os resultados obtidos para a BHAF-PCF através da calibração da terceira versão do modelo LASH pela EC-2 (Figura 104), com relação àqueles obtidos pela EC-1 (Figura 93), tem-se que o escoamento de base foi notoriamente superior quando empregou-se a EC-2, havendo praticamente uma inversão, em termos de proporção, entre esta parcela do escoamento e o escoamento superficial direto. Estes resultados podem ser atribuídos à confiabilidade e representatividade dos parâmetros calibrados, especialmente do λ distribuído por

sub-bacias. Com relação à BHAF-PC, não se verifica, visualmente, variação substancial entre os percentuais dos componentes do escoamento estimados pela EC-1 e pela EC-2.

Nas Figura 106 e Figura 107 são apresentados, para a BHAP-PCF e para a BHAF-PC, respectivamente, os hidrogramas de vazão média mensal observados e estimados, a partir da terceira versão do modelo LASH e da EC-2, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), além do pluviograma total médio da bacia. Os valores das estatísticas de precisão empregadas para analisar o ajuste destes hidrogramas podem ser visualizados na Tabela 16

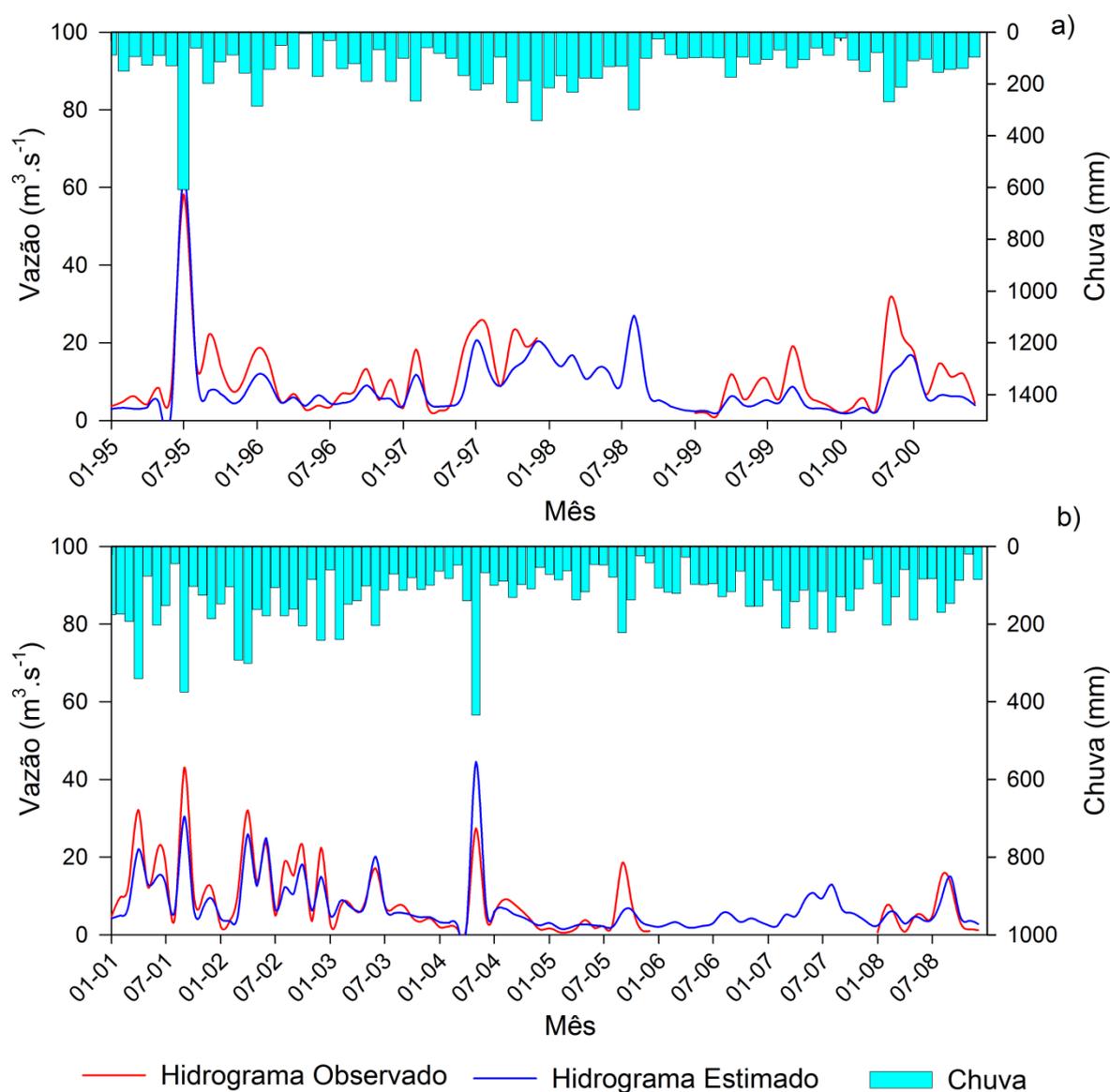


Figura 106 - Pluviogramas médios observados na BHAP-PCF, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-2 e o intervalo de tempo mensal

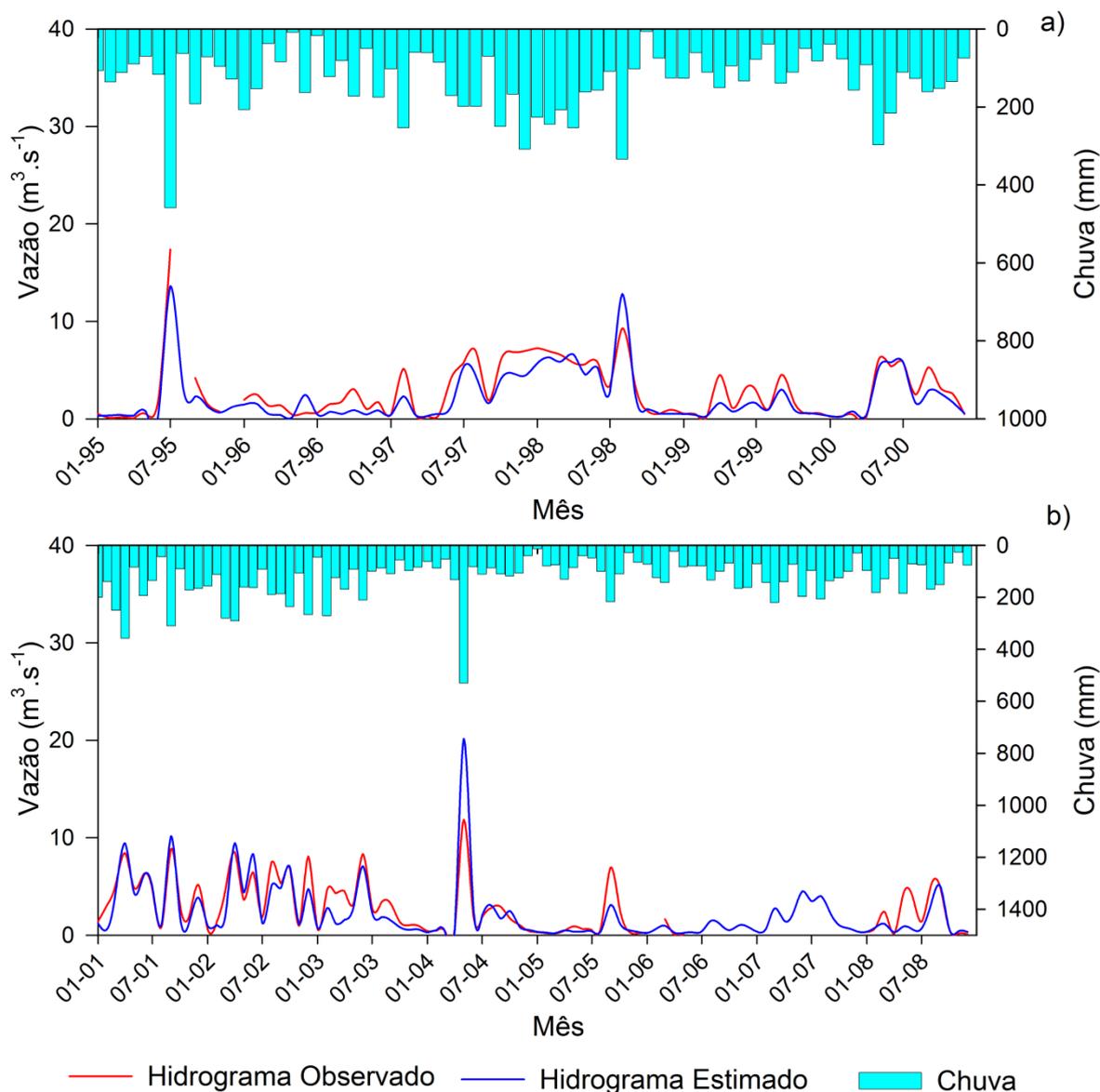


Figura 107 - Pluviogramas médios observados na BHAF-PC, hidrogramas observados na seção de controle e hidrogramas estimados empregando a terceira versão do modelo hidrológico LASH, considerando os períodos de calibração (a) e de validação (b), a EC-2 e o intervalo de tempo mensal

Tabela 16 - Medidas estatísticas para avaliação do desempenho da terceira versão do modelo hidrológico LASH frente aos períodos de calibração e validação, para uma análise de vazões médias mensais, obtidas através da EC-2

Medida estatística	BHAF-PCF		BHAF-PC	
	Calibração	Validação	Calibração	Validação
C_{NS}	0,67	0,76	0,81	0,65
$C_{NS} \log(Q)$	0,60	0,77	0,75	0,78
RMSE	5,38	4,17	1,29	1,58
ΔQ (%)	-11,41	-8,71	22,43	14,83

Pode-se verificar, com base nos resultados apresentados na Tabela 16 e na classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007), que, em termos de C_{NS} e $C_{NS} \log(Q)$, o ajuste do hidrograma médio mensal estimado ao observado foi “muito bom”, com exceção do período de calibração para a BHAP-PCF, pelo valor $C_{NS} \log(Q)$, que pode ser considerado “bom”. Já a estatística ΔQ e a classificação de Van Liew, Arnold e Garbrecht (2003) indicam um ajuste “muito bom” apenas para o período de validação para a BHAP-PCF, tendo o período de calibração para a referida bacia e o período de validação para a BHAF-PC apresentado ajuste “bom” e o período de calibração para a BHAF-PC, apresentado ajuste “satisfatório”.

4 Conclusões

Com base nos resultados apresentados e discutidos neste Capítulo, pôde-se concluir que:

- i. Os valores dos parâmetros calibrados pela EC-1 atingiram convergência em ambas as bacias analisadas, enquanto que pela EC-2, esta não foi verificada de forma tão clara para a BHAP-PCF;
- ii. Dentre as três funções objetivo empregadas, a $C_{NS} \log(Q)$ proporcionou as melhores convergências, tanto visualmente quanto pelas estatísticas de precisão;
- iii. O fato de $C_{NS} \log(Q)$ ter se mostrado superior em relação às demais mostra que foi privilegiada a acurácia na estimativa de vazões de estiagem;
- iv. Os parâmetros calibrados para as bacias analisadas neste estudo condizem com a realidade da bacia, especialmente no caso da EC-1, a qual apresentou estatísticas de desempenho superiores aos resultados apresentados pela EC-2. Ainda, no caso da BHAF-PC, os valores dos parâmetros calibrados pela terceira versão (discretização por sub-bacias) foram similares àqueles obtidos por trabalho anterior com a segunda versão (discretização por células);
- v. O fato de a EC-1 ter apresentado resultados melhores quando comparada à EC-2, dá indícios de que a estrutura do módulo de calibração automático precisa ser melhor avaliada e de que deve-se analisar a possibilidade de empregar métodos de calibração multiobjetivo, os quais são mais aconselháveis, segundo a literatura, quando objetiva-se a utilização do modelo em ambientes não acadêmicos.

3 Considerações Finais

Os aprimoramentos computacionais idealizados e desenvolvidos para a terceira versão do modelo LASH, em especial os módulos processamento da base de dados temporais – SYHDA – e espaciais – ArcLASH – ampliarão sua aplicação, suprimindo a demanda atual por parte de profissionais em recursos hídricos que atuam em empresas, instituições governamentais, associações de usuários de água, comitês de bacia, entre outros.

Já as adaptações realizadas na rotina hidrológica do modelo, no que tange à possibilidade de considerar mais de uma estação pluviométrica e meteorológica quando da estimativa média de tais variáveis, permitirão que este seja utilizado em bacias hidrográficas de grande porte, onde a variabilidade espacial, principalmente da chuva, pode exercer influência considerável sobre a análise.

Com relação à discretização espacial do balanço hídrico por sub-bacias hidrográficas, adotada na terceira versão do modelo LASH, esta culminou num processamento mais rápido quando comparado à segunda versão, na qual o balanço hídrico é discretizado em células regulares, pois que houve uma redução expressiva no número de unidades de análise.

A aplicação do modelo hidrológico LASH foi bastante relevante para as áreas de estudo, haja vista a importância ambiental, social e econômica. O desempenho do modelo frente aos períodos de calibração e de validação foi considerado satisfatório, uma vez que este, segundo as estatísticas de análise empregadas, conseguiu capturar o comportamento geral dos hidrogramas observados nas duas bacias, tanto em períodos de estiagem quanto de cheias, e dos indicadores analisados, permitindo concluir que existe potencial de aplicação desta versão na região sul do Rio Grande do Sul.

Foi observado que a calibração automática com o algoritmo mono-objetivo SCE-UA apresentou desempenho mais satisfatório, estatisticamente, quando realizada de forma concentrada; quando foi calibrado um dos parâmetros de forma distribuída por sub-bacias hidrográficas, as estatísticas apontaram para um desempenho inferior em termos de estimativa de vazões diárias e outros indicadores, principalmente no caso da BHAP-PCF, para a qual o número de parâmetros a serem calibrados desta forma foi bastante superior à BHAF-PC.

Embora o módulo de calibração implementado no modelo LASH seja automático, é indispensável que o usuário do tenha conhecimento sobre o comportamento hidrológico da bacia que está analisando, haja vista que este pode se deparar com a equifinalidade, que é a obtenção de vários conjuntos de parâmetros com valores distintos, porém que produzem resultados finais estatisticamente satisfatórios e bastante semelhantes entre si, sendo impossível distinguir a melhor combinação de parâmetros. Ainda, o usuário pode se deparar com uma situação de existência de um conjunto de parâmetros estatisticamente satisfatórios, mas que não são condizentes com a realidade hidrológica da bacia.

Além disso, a estrutura do módulo de calibração automática da terceira versão do modelo LASH, por se basear em um algoritmo mono-objetivo, exige que o usuário tenha conhecimento acerca da função objetivo que será empregada, uma vez que este pode utilizar, erroneamente, uma função que busque estimativas mais acertadas em períodos que não os de interesse, prejudicando o desempenho do modelo. Neste sentido, observou-se a necessidade de melhor avaliar este módulo e analisar a possibilidade de empregar métodos de calibração multiobjetivo, os quais são mais aconselháveis, segundo a literatura, quando objetiva-se a utilização do modelo em ambientes não acadêmicos. Esta é uma das grandes lacunas para trabalhos técnico-científicos posteriores envolvendo a terceira versão do modelo LASH, juntamente com sua avaliação em bacias hidrográficas de outras regiões do país.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome: FAO, 1998. 300 p.

ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre o uso da água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 159-170, 2003. Doi: 10.1590/S0100-67622003000200006.

ALVARENGA, C. C. et al. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1745-1757, 2011. Doi: 10.1590/S0100-06832011000500029.

ANA. **HidroWeb Sistema de Informações Hidrológicas**, 2015. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 28 agosto 2015.

AQUINO, L. S. **Modelagem hidrológica na região sul do Rio Grande do Sul utilizando os modelos SWAT e LASH**. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, p. 101. 2014.

ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment: part I: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998. Doi: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.

ASCE. Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management Committee Irrigation and Drainage Division. "Criteria for evaluation of watershed models". **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 119, n. 3, p. 429-442, 1993. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:3(429).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9241-11**. Requisitos ergonômicos para o trabalho com dispositivos de interação visual: Parte 11: Orientações sobre usabilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1998. 26 p. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br/ufpel/norma.aspx?ID=86090>>. Acesso em: 08 agosto 2015.

BAO, H. et al. Hydrological daily rainfall-runoff simulation with BTOPMC model and comparison with Xin'anjiang model. **Water Science and Engineering**, v. 3, n. 2, p. 121-131, 2010. Doi: 10.3882/j.issn.1674-2370.2010.02.001.

BEARD, L. R. **Optimization techniques for Hydrologic Engineering**. Technical Paper N.2. Davis: Hydrological Engineer Center, 1966.

BEASLEY, D. B.; HUGGINS, L. F.; MONKE, E. J. Answer: a model for watershed planning. **Transactions of the America Society of Agricultural Engineers**, v. 23, p. 938-944, 1980.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7^a. ed. Viçosa: UFV, 2005. 596 p. ISBN 8572692428.

BESKOW, S. **LASH Model: a hydrological simulation tool in GIS framework**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 118. 2009.

BESKOW, S. et al. Estimativa do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 169-178, 2009a. Doi: 10.1590/S0100-06832009000100018.

BESKOW, S. et al. Soil erosion prediction in the Grande River, Brazil using distributed modeling. **Catena**, v. 79, p. 49-59, 2009b. Doi: 10.1016/j.catena.2009.05.010.

BESKOW, S. et al. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. **Catena**, v. 86, n. 3, p. 160-171, 2011. Doi: 10.1016/j.catena.2011.03.010.

BESKOW, S. et al. Desenvolvimento de um sistema computacional de aquisição e análise de dados hidrológicos. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Bento Gonçalves: ABRH. 2013. p. 1-8.

BESKOW, S. et al. Índices de sazonalidade para regionalização hidrológica de vazões de estiagem no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 7, p. 748-754, 2014. Doi: 10.1590/S1415-43662014000700012.

BESKOW, S. et al. Legislação para Autorizar o Uso da Água em uma Bacia Hidrográfica. In: RODRIGUES, C. **Programa Gestor de Recursos Hídricos**. 978-85-67722-49-8. ed. Santa Cruz do Sul: Essere Nel Mondo, 2015. p. 22-24.

BESKOW, S. et al. Multiparameter probability distributions for heavy rainfall modeling in extreme southern Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 123-133, 2015. Doi: 10.1016/j.ejrh.2015.06.007.

BESKOW, S. et al. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, 2016. Doi: 10.1080/02626667.2015.1133912.

BESKOW, S.; MELLO, C. R. D.; NORTON, L. D. Development, sensitivity and uncertainty analysis of LASH model. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 265-274, 2011. Doi: 10.1590/S0103-90162011000300001.

BESKOW, S.; NORTON, L. D.; MELLO, C. R. Hydrological Prediction in a Tropical Watershed Dominated by Oxisols Using a Distributed Hydrological Model. **Water Resources Management**, v. 27, p. 341-363, 2013. Doi:10.1007/s11269-012-0189-8.

BESKOW, S.; SOUZA, M. R.; LUZ, E. P. D. Ciclo hidrológico. In: RODRIGUES, C. **Programa Gestor de Recursos Hídricos**. Santa Cruz do Sul: Essere Nel Mondo, 2015. Cap. 1, p. 6-12. ISBN 978-85-67722-49-8.

BEVEN, J. K.; BINLEY, A. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. **Hydrological Processes**, v. 6, p. 279-298, 1992. Doi: 10.1002/hyp.3360060305.

BEVEN, K. J. **Rainfall-runoff modelling: the primer**. 1^a. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. ISBN 9780470866719.

BEVEN, K. J. A manifesto for equifinality thesis. **Journal of Hydrology**, v. 320, n. 1-2, p. 18-36, 2006. Doi:10.1016/j.jhydrol.2005.07.007.

BEVEN, K. J.; FREER, J. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modeling of complex environmental systems using the GLUE methodology. **Journal of Hydrology**, v. 249, n. 1-4, p. 11-29, 2001. Doi:10.1016/S0022-1694(01)00421-8.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979. Doi:10.1080/02626667909491834.

BORMANN, H. et al. Analysing the effects of soil properties changes associated with land use changes on the simulated water balance: A comparison of three hydrological catchment models for scenario analysis. **Ecological Model**, v. 2009, n. 1, p. 29-40, 2007. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.07.004.

BRASIL. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Departamento Nacional De pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. Recife: Ministério da Agricultura., 1973. 431 p.

BRAVO, J. M. et al. Impact of projected climate change on hydrologic regime of the Upper Paraguay River basin. **Climatic change**, v. 127, p. 27-41, 2014. Doi: 10.1007/s10584-013-0816-2.

BUCHIANERI, V. C. **Geração de série histórica de vazão por meio do modelo SMAP: subsídio para o plano de manejo da bacia do rio Grande de Ubatuba**. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Universidade de São Paulo. Piracicaba, p. 105. 2004.

CALDEIRA, T. L. et al. Modelagem probabilística de eventos de precipitação extrema no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 197-203, 2015. Doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p197-203.

CASTRO, C. B. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do Cerrado intensamente monitorada**. Dissertação (Mestrado em Geoprocessamento e Análise Ambiental). Universidade de Brasília. Brasília, p. 122. 2013.

CHAHINE, M. T. The hydrological cycle and its influence on climate. **Nature**, v. 359, n. 1, p. 373-380, 1992.

CHEN, L. et al. Optimal parameters for the Green-Ampt infiltration model under rainfall conditions. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 63, p. 93-101, 2015. Doi: 10.1515/johh-2015-0012.

CHOW, V. T. **Handbook of Applied hydrology** - a compendium of water resources technology. New York: McGraw-Hill, 1964. 1495 p. ISBN 978-0070107748.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1988. 588 p. ISBN 0070108102.

CLARK, C. O. Storage and the Unit Hydrograph. **Transactions American Society Civil Engineers**, v. 110, p. 1419-1488, 1945.

COLLISCHONN, B. **Uso da precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 128. 2006.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. Tese (Doutorado em Engenharia)**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 194. 2001.

COLLISCHONN, W. et al. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. **Journal of Hydrology**, v. 305, n. 1, p. 87-98, 2005. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.028.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2013. 336 p. ISBN 9788588686342.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 3, p. 27-41, 2003.

CORRÊA, L. D. L. **Implementação e Análise de Técnicas de Inteligência Artificial Aplicadas à Clusterização em Recursos Hídricos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação). Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, p. 88. 2014.

CORRÊA, L. L. et al. Módulo de aquisição e análise de dados hidrológicos para o modelo hidrológico LASH. **XXII Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas**. Pelotas: UFPel. 2013. p. 1-4.

CORRÊA, L. L. et al. Aplicativo computacional SYHDA: Avaliação do módulo de modelagem probabilística de séries hidrológicas. **XXIII Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas**. Pelotas: UFPel. 2014. p. 1-4.

COU, L. et al. Effects of a century of land cover and climate change on the hydrology of Puget Sound basin. **Hydrological Processes**, v. 23, n. 6, p. 907-933, 2009. Doi: 10.1002/hyp.7228.

CRAWFORD, N. H.; BURGESS, S. J. History of the Stanford Watershed Model. **Water Resources Impact**, v. 6, n. 2, p. 3-5, 2004.

CRAWFORD, N. H.; LINSLEY, R. K. **Digital simulation in hydrology: the Stanford Watershed Model**. Palo Alto: Department of Civil Engineering/Stanford University, 1966. 210 p.

CUNGE, J. A. On the subject of a flood propagation method (Muskingum Method). **Journal of Hydraulic Research**, v. 7, n. 2, p. 205-230, 1969. Doi: 10.1080/00221686909500264.

DAKHLAOUI, H.; BARGAOUI, Z.; BÁRDOSY, B. Toward a more efficient Calibration Schema for HBV rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**, v. 444-445, n. 11, p. 161-179, 2012. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.04.015.

DAWDY, D. D.; O'DONNELL, T. Mathematical Models of Catchments Behavior. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 91, n. 4, p. 123-137, 1965.

DAWDY, D. R.; LICHTY, R. W.; BERGMAN, J. M. **A Rainfall Runoff Model for Estimation of Flood Peaks for Small Drainage Basins**. A Progress Report, U. S. Geological Survey Open File Report, 1970.

DE ROO, A. P. J.; WESSELING, C. G.; RITSEMA, C. J. LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output. **Hydrological Processes**, v. 10, n. 8, p. 1107-1117, 1996. Doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(199608)10:8<1107::AID-HYD1107>2.0.CO;2-4.

DEVKOTA, L. P.; GYAWALI, D. R. Impacts of climate change on hydrological regime and water resources management of the Koshi River Basin, Nepal. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, n. B, p. 502-515, 2015. Doi: 10.1016/j.ejrh.2015.06.023.

DICKINSON, R. E. Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models. In: _____ **Climate processes and climate sensitivity**. Washington: AGU, v. 29, 1984. p. 58-72. (Moogr. Series: AGU).

DOOGE, J. **Linear Theory of Hydrological Systems**. Technical Bulletin n. 1468. Washington DC: Agricultural Research Service - US Department of Agriculture, 1973. 327 p.

DUAN, Q. Y.; GUPTA, V. K.; SOROOSHIAN, S. Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization. **Journal of Optimization**

Theory and Applications, v. 76, n. 3, p. 501-521, 1993. Doi: 10.1007/BF00939380.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. **Water Resources Research**, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992. Doi: 10.1029/91WR02985.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. **Journal of Hydrology**, v. 158, n. 3-4, p. 265-284, 1994. Doi: 10.1016/0022-1694(94)90057-4.

ECKHARDT, K. et al. SWAT-G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 27, n. 9-10, p. 641-644, 2002. Doi: 10.1016/S1474-7065(02)00048-7.

ECKHARDT, K.; ARNOLD, J. G. Automatic calibration of a distributed catchment model. **Journal of Hydrology**, v. 251, p. 103-109, 2001. Doi: 10.1016/S0022-1694(01)00429-2.

EMBRAPA. **Estação Agroclimatológica de Pelotas**, Convênio Embrapa/UFPEL, 2015. Disponível em: <<http://www.cpact.embrapa.br/agromet/estacao/estacao.html>>. Acesso em: 19 mar. 2015.

ESRI. **Environmental Systems Research Institute**, 2014.

FAGUNDES, J. L. et al. Características morfogênicas e estruturais do capim-braquiária em pastagem adubada com nitrogênio avaliadas nas quatro estações do ano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 1, p. 21-29, 2006. Doi: 10.1590/S1516-35982006000100003.

FAVARIN, J. L. et al. Equações para estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 6, p. 769-773, 2002. Doi: 10.1590/S0100-204X2002000600005.

FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. **USDA – water erosion prediction project (WEPP) hillslope profile and watershed model documentation**. West Lafayette: National Erosion Research Laboratory, 1995. 228 p.

GAN, T. Y.; BIFTU, G. F. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: Optimization algorithms, catchment conditions, and model structure.

Water Resources Research, v. 32, n. 12, p. 3513-3524, 1996. Doi: 10.1029/95WR02195.

GOMES, N. M. et al. Aplicabilidade do LISEM (Limburg Soil Erosion Model) para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica tropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2483-2492, 2008. Doi: 10.1590/S0100-06832008000600025.

GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. Macro-scale hydrological modeling: a Scandinavian experience. **International Symposium on: "Can Science and Society Save the Water Crisis in the 21st Century: Reports from the world"**. Tokyo: Japan Society of Hydrology and Water Resources. 2000. p. 38-45.

GRAY, W. G.; MILLER, C. T. Examination of Darcy's Law for Flow in Porous Media with Variable Porosity. **Environmental Science and Technology**, v. 38, p. 5895-5901, 2004. Doi: 10.1021/es049728w.

GREEN, C. H. et al. Hydrologic evaluation of the Soil and Water Assessment Tool for a large tile-drained watershed in Iowa. **Transactions of the ASABE**, v. 49, n. 2, p. 413-422, 2006.

GREEN, W. H.; AMPT, G. A. Studies of soil physics, part I - the flow of air and water through soils. **The Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 1, p. 1-24, 1911. Doi: 10.1017/S0021859600001441.

GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A. Do we still need the Rational Formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins. **Hydrological Sciences Journal**, v. 60, n. 1, p. 67-77, 2015. Doi: 10.1080/02626667.2014.880546.

GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F. Comparação dos métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidrelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 13-20, 2007.

HARTMANN, H. C.; BALES, R.; SOROOSHIAN, S. **Weather, climate and hydrologic forecasting for the southwest U.S.** Tucson: The University of Arizona, 1999. 172 p.

HASENACK, H.; WEBER, E. **Base cartográfica vetorial continua do Rio Grande do Sul – escala 1:50.000.** UFRGS - Centro de Ecologia. Porto Alegre. 2010. (9788563843012).

HEC. **HEC Models for Urban Hydrologic Analysis**. U. S. Army Corps Engineering, Hydrological Engineering Center. Davis, p. 24. 1994.

HER, Y.; CHAUBEY, I. Impact of the numbers of observations and calibration parameters on equifinality, model performance, and output and parameter uncertainty. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 19, p. 4220-4237, 2015. Doi: 10.1002/hyp.10487.

HORTON, R. E. The rôle of infiltration in the hydrologic cycle. Eos, **Transactions American Geophysical Union**, v. 14, n. 1, p. 446-460, 1933. Doi: 10.1029/TR014i001p00446.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. Some statistics useful in regional frequency analysis. **Water Resources Research**, v. 29, n. 2, p. 271-281, 1993. Doi: 10.1029/92WR01980.

IBGE. **Censo Demográfico 2010**, 2010. Disponível em: <<http://ibge.gov.br/cidadesat/painel/populacao.php?lang=&codmun=431440&search=rio-grande-do-sul|pelotas|infograficos:-evolucao-populacional-e-piramide-etaria>>. Acesso em: 23 outubro 2015.

INMET. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**, 2015. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em: 28 agosto 2015.

JETTEN, V. **LISEM user manual: draft version January 2002**. The Netherlands: Utrecht University, 2002. 148 p.

KLEMEŠ, V. Operational testing of hydrological simulation. **Hydrological Sciences Journal**, v. 31, n. 1, p. 13-24, 1986. Doi: 10.1080/02626668609491024.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2001.

LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. Evaluating the use of "goodness of fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 26, p. 69-86, 1999. Doi: 10.1029/1998WR900018.

LENHART, T. et al. Comparasion of two different approaches of sensitivity analysis. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 27, n. 9-10, p. 645-654, 2002. Doi: 10.1007/BF01743071.

LICCIARDELO, F. et al. Runoff and Soil Erosion Evaluation by the AnnAGNPS Model in a Small Mediterranean Watershed. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 5, p. 1585-1593, 2007. Doi: 10.13031/2013.23972.

LIMA, W. P. **Princípios de hidrologia florestal para manejo de bacias hidrográficas**. São Paulo: ESALQ, 1986. 242 p.

LINSLEY, R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. **Applied Hydrology**. New York: Tata McGraw-Hill, 1975. 689 p.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. SMAP- a simplified hydrologic model [Soil moisture accounting procedure, rural watersheds, Brazil]. **Water Resources Publications**, p. 167-176, 1982.

LOPES, J. E.; BRAGA, B. F. F.; CONEJO, J. L. **A simplified Hydrologic Model in Applied Modeling in Catchment Hydrology**. Ed. V.P. Singh: Water Resources Publication, 1982.

LOU, R. F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha/RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 174. 2010.

MAGAND, C. et al. Parameter transferability under changing climate: case study with a land surface model in the Durance watershed, France. **Hydrological Sciences Journal**, v. 60, n. 7-8, p. 1408-1423, 2015. Doi: 10.1080/02626667.2014.993643.

MAIDMENT, D. R. GIS and hydrologic modeling. In: GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. **Environmental modeling with GIS**. New York: Oxford University, 1993. Cap. 14, p. 147-167. ISBN 0195080076.

MANFRON, P. A. B. O. O. S. et al. Modelo do índice de área foliar da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 2, p. 333-342, 2003.

MARINHO FILHO, G. M. et al. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

MARQUES FILHO, A. O.; DALLAROSA, R. G.; PACHÊCO, V. B. Radiação solar e distribuição vertical de área foliar em floresta - Reserva Biológica do Cuieiras - ZF2, Manaus. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 4, p. 427-436, 2005. Doi: 10.1590/S0044-59672005000400007.

MCCARTHY, G. T. **The unit hydrograph and flood routing**. Providence: Army Engineer District, 1939.

MEIN, R. G.; LARSON, C. L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, v. 9, p. 384-394, 1973. Doi: 10.1029/WR009i002p00384.

MELLO, C. R. D. et al. Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 1, 2016. Doi: 10.1590/S1413-705420160001000.

MELLO, C. R. D.; SILVA, A. M. D. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. 1ª. ed. Lavras: UFLA, 2013. 455 p. Doi: 9788581280296.

MELLO, C. R. et al. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, v. 75, n. 3, p. 235-247, 2008. Doi: 10.1016/j.catena.2008.07.002.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M. Simulação do deflúvio e vazão de pico em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 410-419, 2007. Doi: 10.1590/S1415-43662007000400011.

MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. R. M. Escalas hidrológicas I: conceitos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 21-44, 1997.

MERO, F. **An approach to daily hydro-meteorological water balance computations for surface and groundwater basins**. Proc. ITC-UNESCO Seminar for Integrated River Basin Development. Delft: ITC-UNESCO. 1969.

MICHEL, C.; PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V. The exponential store: a correct formulation for rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48, n. 1, p. 109-124, 2003. Doi: 10.1623/hysj.48.1.109.43484.

MIRANDA, A. C. et al. **Carbon dioxide fluxes over a cerrado sensu stricto in central Brazil**. In: GASH, J. H. C., et al. Amazonian deforestation and climate. New York: Wiley, 1996. p. 353-364.

MIRANDA, R. A. C.; OLIVEIRA, M. V. S.; SILVA, D. F. D. Ciclo hidrológico planetário: abordagens e Conceitos. **Geo UERJ**, v. 1, n. 21, p. 109-119, 2010.

MISHRA, S. K. et al. A modified SCA-CN method: Characterization and testing. **Water Resources Management**, v. 17, n. 1, p. 37-68, 2003. Doi: 10.1023/A:1023099005944.

MISHRA, S. K. et al. An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology. **Water Resources Management**, v. 20, n. 5, p. 646-660, 2006. Doi: 10.1007/s11269-005-9000-4.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidrológica). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 81. 2005.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 885-900, 2007. Doi: 10.13031/2013.23153.

MULETA, M. K.; NICKLOW, J. W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. **Journal of Hydrology**, v. 306, n. 1-4, p. 127-145, 2005. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.09.005.

MULVANEY, T. J. On the use of the self-registering and flood gauges in making observations on the relation of rainfall and flood discharges in a given catchment. **Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland**, v. 4, n. 2, p. 18-33, 1851.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-298, 1970. Doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool, theoretical documentation, version 2005**. Temple: USDA/ARS, 2005. 494 p.

NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. **The Computer Journal**, v. 7, n. 4, p. 308-313, 1965. Doi: 10.1093/comjnl/7.4.308.

NOTTER, B. et al. Impacts of environmental change on water resources in th Mt. Kenya Region. **Journal of Hydrology**, v. 343, p. 266-278, 2007. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.06.022.

NOTTER, B. et al. Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya region. **Journal of Hydrology**, v. 343, n. 3-4, p. 266-278, 2007. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.06.022.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, A. N.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PEREIRA, D. D. S. et al. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 5, p. 149-163, 2016. Doi: 10.1016/j.ejrh.2015.11.008.

PERRIN, C. et al. Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall-runoff models. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 1, p. 131-151, 2007. Doi: 10.1623/hysj.52.1.131.

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. **Journal of Hydrology**, v. 279, n. 1/4, p. 275-289, 2003. Doi: 10.1016/S0022-1694(03)00225-7.

PERROTTA, M. M. **Processamento digital básico de imagens de sensores remotos ópticos para uso em mapeamento geológico – Programa ENVI**. Belo Horizonte: CPRM, 2005. 43 p.

PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. Conservação de Volume em Modelos Simplificados de Propagação de Vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 4, p. 83-96, 2012.

PRESS, F. et al. **Understanding Earth**. 4^a. ed. New York: W. H. Freeman, 2004. 568 p. ISBN 0716796171.

PRUSKI, F. F. et al. A model to design level terraces. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 123, n. 1, p. 8-12, 1997. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:1(8).

PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 301-307, 2001. Doi: 10.1590/S1415-43662001000200021.

PULS, L. G. Construction of Flood Routing Curves. **House Document 185. U. S. 70th Congress, 1st session**. Washington D. C.: [s.n.]. 1928. p. 46-52.

RAGHUNATH, H. M. **Hydrology: Principles, Analyses and Design**. New Delhi: New Age International, 2006. 476 p. ISBN 9788122418255.

RAWLS, W. J. et al. Infiltration and soil water movement. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993. Cap. 50-07-039732-5, p. 1-51.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2ª. ed. Barueri: Manole, 2012. 524 p. ISBN 85-204-1773-6.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José, p. 146. 2003.

RIBEIRO NETO, A. **Simulação hidrológica na Amazônia: Rio Madeira**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 178. 2006.

ROCKWOOD. Columbia Basin streamflow routing by computer. **Journal of the Waterways and Harbors Division**, v. 84, n. 5, p. 1-15, 1958.

ROCKWOOD, D. M. Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation. In: **PACIFIC, U. S. A. E. D. N. Engineering Studies Project 171, Technical Bulletin No. 22**. Oregon: [s.n.], 1964.

ROCKWOOD, D. M. Application of Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation - "SSARR" - Program to the Lower Mekong River. **Publication No. 80. Symposium Tucson**. Tucson: [s.n.]. 1968.

ROSS, C. N. The calculation of flood discharge by the use of a time contour plan. **Transactions of the Institution of Engineers**, v. 2, p. 85-92, 1921.

SALTELLI, A. et al. **Sensitivity Analysis in Practice: a guide to assessing scientific models**. Chichester: Wiley, 2004. 219 p. ISBN 0-470-87093-1.

SANEP. **Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas**, 2015. Disponível em: <<http://www.pelotas.rs.gov.br/sanep/captacao/>>. Acesso em: 23 outubro 2015.

SCS. **National Engineering Handbook**. Washington: Soil Conservation Service/USDA, 1971.

SHERMAN, L. K. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. **Engineering News Record**, v. 108, p. 501-505, 1932.

SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993. p. 1-53. ISBN 0070397325.

SILVA, J. M. A. et al. Modelo para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 1, p. 78-84, 2009. Doi: 10.5039/agraria.v4i1a13.

SILVA, P. M. D. O. et al. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 258-265, 2008. Doi: 10.1590/S1415-43662008000300006.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: The question of parameter observability and uniqueness. **Water Resources Research**, v. 19, n. 1, p. 260-268, 1983. Doi: 10.1029/WR019i001p00260.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Model calibration. In: SINGH, V. J. **Computer models of watershed hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1995. Cap. 2. ISBN 10: 1-887201-74-2.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K.; FULTON, J. Evaluation of Maximum Likelihood Parameter Estimation Techniques for Conceptual Rainfall-Runoff Models: Influence of Calibration Data Variability and Length on Model Credibility. **Water Resources Research**, v. 19, n. 1, p. 251-259, 1983. Doi: 10.1029/WR019i001p00251.

SPAROVEK, G.; VAN LIER, Q. D. J.; DOURADO NETO, D. Computer assisted Koeppen climate classification: a case study for Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 257-266, 2007. Doi: 10.1002/joc.1384.

SUGUIO, K. **Água**. Ribeirão Preto: Holos, 2006. 242 p. ISBN 85-86699-52-7.

THANAPAKPAWIN, P. et al. Effects of landuse change on the hydrologic regime of the Mae Chaem river basin, NW Thailand. **Journal of Hydrology**, v. 334, n. 1-2, p. 215-230, 2007. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.10.012.

TOMER, S. K. **Python in hydrology**. 1ª. ed. Boston: Green Tea Press, 2011.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005. 678 p. ISBN 9788570258236.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p. ISBN 9788570259240.

VAN GRIENSVEN, A. et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**, v. 324, n. 1-4, p. 10-23, 2006. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.09.008.

VAN LIEW, M. W.; ARNOLD, J. G.; GARBRECHT, J. D. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: choosing between two models. **Transactios of the ASAE**, v. 46, n. 6, p. 1539-1551, 2003. Doi: 10.13031/2013.15643.

VARGAS, M. M. et al. Técnicas de Inteligência Artificial para regionalização hidrológica: uma análise da Q90 no Rio Grande do Sul. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Brasília: ABRH. 2015. p. 1-8.

VARGAS, M. M. et al. Análise de constantes de desagregação de chuva diária no estado do Rio Grande do Sul. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Brasília: ABRH. 2015a. p. 1-8.

VIEUX, B. E. **Distributed hydrologic modeling using GIS**. 2º. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. 289 p.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na região do Alto Rio Grande a montante do Reservatório de Camargos/CEMIG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 120. 2008.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na cabeceira da Bacia Hidrográfica do Rio Grande de cenários de usos do solo e mudanças climáticas A1B**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 286. 2011.

VIOLA, M. R. et al. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 581-590, 2009. Doi: 10.1590/S1415-43662009000500011.

VIOLA, M. R. et al. Modelagem hidrológica em uma sub-bacia hidrográfica do baixo rio Araguaia, TO. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, n. 3, p. 38-47, 2012.

VIOLA, M. R. et al. Applicability of the LASH Model for hydrological simulation of the Grand River Basin, Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 12, p. 1639-1652, 2013. Doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000735.

VIOLA, M. R. et al. Impacts of land-use changes on the hydrology of the Grande river basin headwaters, Southeastern, Brazil. **Water Resources Management**, v. 28, n. 13, p. 4537-4550, 2014. Doi: 10.1007/s11269-014-0749-1.

VIOLA, M. R. et al. Assessing climate change impacts on Upper Grande River basin hydrology, Southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 6, p. 1665-1679, 2015. Doi: 10.1002/joc.4038.

VRUGT, J. A. et al. Application of stochastic parameter optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting model. **Journal of Hydrology**, v. 325, n. 1-4, p. 288-307, 2006. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.10.041.

WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. Sensitivity Analysis, Calibration and Validation for a Multisite and Multivariable SWAT Model. **Journal of the American Water Resources Association**, p. 1077-1089, 2005.

WIGMOSTA, M. S.; VAIL, L. W.; LETTENMAIER, D. P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. **Water Resources Research**, v. 30, n. 6, p. 1665-1679, 1994. Doi: 10.1029/94WR00436.

WMO. **Intercomparasion of conceptual model used in operational hydrological forecasting**. World Meteorological Organization, Operational Hydrology Report n. 7. [S.l.]. 1975.

XIONG, L.; GUO, S. Effects of the catchment coefficient on the performance of TOPMODEL in rainfall-runoff modelling. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 10, p. 1823-1836, 2004. Doi: 10.1002/hyp.1449.

XIONG, L.; O'CONNOR, K. M. Analysis of the response surface of the objective function by the optimum parameter curve: how good can the optimum parameter values be? **Journal of Hydrology**, v. 234, n. 3-4, p. 187-207, 2000. Doi: 10.1016/S0022-1694(00)00250-X.

ZAPPA, M. **Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales**. (PhD Thesis). Swiss Federal Institute of Technology. Switzerland, p. 157. 2002.

ZHANG, H. G. et al. Potential effectc of climate change on runoff in the Yellow River Basin of China. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 911-918, 2007. Doi: 10.1175/JHM-D-10-05004.1.

ZHOU, M. C. et al. Estimating potential evapotranspiration using Shuttleworth-Wallace model and NOAA-AVHRR NDVI data to feed a distributed hydrological model over the Mekong River basin. **Journal of Hydrology**, v. 327, n. 1/2, p. 151-173, 2006. Doi 10.1016/j.jhydrol.2005.11.013.