

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



**Tese**

**WebLASH: uma plataforma web para o modelo hidrológico LASH**

**Marcelle Martins Vargas**

**Pelotas, 2023**

**Marcelle Martins Vargas**

**WebLASH: uma plataforma web para o modelo hidrológico LASH**

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

Orientador: Samuel Beskow

Pelotas, 2023

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

V297w Vargas, Marcelle Martins

WebLASH : uma plataforma web para o modelo hidrológico LASH / Marcelle Martins Vargas ; Samuel Beskow, orientador. — Pelotas, 2023.

88 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2023.

1. Modelagem hidrológica. 2. Hidrologia. 3. Ferramentas web. I. Beskow, Samuel, orient. II. Título.

CDD : 627

Marcelle Martins Vargas

WebLASH: uma plataforma web para o modelo hidrológico LASH

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutora em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 28 de julho de 2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Samuel Beskow (Orientador)

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras

Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello

Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras

Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Viola

Doutor em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Lavras

Prof. Dr. Marilton Sanchotene de Aguiar

Doutor em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

A minha mãe e ao meu avô (*in memoriam*).

DEDICO

## Agradecimentos

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Samuel Beskow*, pela dedicação, ensinamento e incentivo desde a iniciação científica.

Às amigas *Maíra, Tamara e Zandra*, pela parceria.

Aos amigos que a Eng. Hídrica me presenteou, *Joana, João e Maria*, por 10 anos de amizade e pela volta de 19 km na Pampulha (me disseram que eram 5 km).

Às minhas amigas *Ariadni e Mauren*, por serem ouvidos em todas as horas. Obrigada até pelas broncas na época do Assis Brasil.

À minha segunda família, *Mara Alice, Marta e Rosângela*. Obrigada por todas as boas conversas e doces de domingo.

Ao meu noivo, *Salomão*, por incentivar minha paixão pela natureza e pelos números. Obrigada por ser a pessoa que vai estar em todas as minhas dedicatórias.

À minha mãe, *Cristina*, por ser o meu exemplo diário e a pessoa que eu mais admiro no mundo. Obrigada por ser minha melhor amiga.

Ao meu pai, *Marcelo*, pelos abraços e olhares que carregam longas conversas.

À minha avó, *Geneci*, por ter me ajudado a abrir as portas depois de 2008.

Ao meu avô, *Berlamino (in memoriam)*, por ter me ensinado que eu posso ser tudo o que eu sonhar. Eu busco lembrar disso diariamente.

Ao *Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos* e à *Universidade Federal de Pelotas*, pela oportunidade de estudo e aprendizado.

Ao apoio da *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES)* – Código de Financiamento 001, até 05/2021.

*"Não é todo dia que você acorda com uma missão em mente, mas eu tinha uma missão e estava determinada a cumpri-la."*

*- The Autobiography of NASA Mathematician  
Katherine Johnson (2020)*

## Resumo

VARGAS, Marcelle Martins. **WebLASH: uma plataforma web para o modelo hidrológico LASH**. 2023. 88f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

A modelagem hidrológica em bacias hidrográficas a partir da utilização de ferramentas computacionais tem ganhado espaço, principalmente com o intuito de melhorar a interação usuário-modelo, bem como a exploração de resultados. Dentre os modelos hidrológicos disponíveis, pode-se destacar o *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH), o qual é um modelo simplificado, que requer poucos parâmetros, idealizado para uma realidade de escassez de dados, típica de bacias brasileiras e que tem sido utilizado com desempenho satisfatório. A finalidade do LASH é realizar a modelagem de bacias hidrográficas a partir do balanço hídrico, considerando o armazenamento de água no solo e sua influência na evapotranspiração e na geração dos escoamentos superficial direto, subsuperficial e de base. O LASH possui versões em linguagens de programação de tipologia distintas, e.g. compilada em C++ e em Delphi, e interpretada em MATLAB® e R, comprovando a possibilidade de versionamento do modelo. As últimas versões têm buscado responder ao seguinte questionamento: por que não continuar utilizando o LASH nas versões em planilhas eletrônicas ou em linguagens compiladas? A resposta dessa pergunta contempla o objetivo para o qual esse estudo se propõe: a implementação do modelo em um ambiente web, visando fomentar a utilização do LASH por profissionais da área, principalmente na consultoria, onde ainda há pouco acesso a modelos nesse ferramental. Além disso, outras demandas podem ser atendidas, tais como ensino e atendimento a órgãos públicos, principalmente de gestão de recursos hídricos. Nesse sentido, a principal contribuição deste estudo foi a construção do LASH em uma plataforma web a partir de bibliotecas da linguagem de programação R para que usuários sem conhecimentos em programação possam realizar modelagens hidrológicas a partir de um modelo hidrológico semi-conceitual. Além da versão web (WebLASH), outras duas versões de apoio, idealizadas a partir do WebLASH, também foram implementadas: um executável (E-LASH) e um conjunto de funções para R (F-LASH). A principal diferença do WebLASH para as versões anteriores e as duas versões complementares, é que a única opção da distribuição espacial da modelagem é a concentrada para a bacia hidrográfica, enquanto que no E-LASH e no F-LASH também contemplam a opção de modelagem semi-distribuída por sub-bacias. As versões complementares potencializam a utilização do WebLASH por usuários que queiram utilizar o modelo via R, para entender o equacionamento dos processos hidrológicos, por exemplo, e/ou que necessitem utilizar sua versão semi-distribuída. Dentre os resultados alcançados neste estudo, destacam-se: i) as simplificações e melhorias metodológicas conduzidas no desenvolvimento do WebLASH se mostraram eficientes; ii) ainda na versão inicial, o WebLASH possui grande potencial de ser aplicado na área da consultoria e como ferramenta de ensino; e iii) o E-LASH e o F-LASH tendem a expandir, em termos de metodologia, as modelagens que podem ser realizadas a partir do WebLASH.

**Palavras-chave:** Modelagem hidrológica. Hidrologia. Ferramentas web.



## Abstract

VARGAS, Marcelle Martins. **WebLASH: a web platform for the LASH hydrological model**. 2023. 88f. Thesis (Doctor in Water Resources) – Graduate Program in Water Resources, Center for Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2023.

Hydrological modeling in watersheds from the use of computational tools has gained space, mainly with the aim of improving the user-model interaction, as well as the exploration of results. Among the available hydrological models, the Lavras Simulation of Hydrology (LASH) can be highlighted, which is a simplified model, which requires few parameters, idealized for a reality of data scarcity, typical of Brazilian watersheds and which has been used with satisfactory performance. The purpose of LASH is to model watersheds based on the water balance, considering the storage of water in the soil and its influence on evapotranspiration and on the generation of surface, subsurface and base runoff. LASH has versions in programming languages of different typology, *e.g.* compiled in C++ and in Delphi, and interpreted in MATLAB® and R, proving the possibility of model versioning. The latest versions have sought to answer the following question: why not continue using LASH in spreadsheet versions or in compiled languages? The answer to this question contemplates the objective for which this study is proposed: the implementation of the model in a web environment, aiming to encourage the use of LASH by professionals in the area, mainly in consulting, where there is still little access to models in this tool. In addition, other demands can be met, such as education and assistance to public agencies, mainly in the management of water resources. In this sense, the main contribution of this study was the construction of LASH on a web platform from libraries of the R programming language so that users without programming knowledge can carry out hydrological modeling from a semi-conceptual hydrological model. In addition to the web version (WebLASH), two other support versions, devised from WebLASH, were also implemented: an executable (E-LASH) and a set of functions for R (F-LASH). The main difference of WebLASH for the previous versions and the two complementary versions, is that the only option of the spatial distribution of the modeling is the concentrated one for the hydrographic basin, while in the E-LASH and in the F-LASH they also contemplate the option of modeling semi-distributed by sub-basins. Complementary versions enhance the use of WebLASH by users who want to use the model via R, to understand the equation of hydrological processes, for example, and/or who need to use its semi-distributed version. Among the results achieved in this study, the following stand out: i) the simplifications and methodological improvements carried out in the development of WebLASH proved to be efficient; ii) still in its initial version, WebLASH has great potential to be applied in the consulting area and as a teaching tool; and iii) E-LASH and F-LASH tend to expand, in terms of methodology, the modeling that can be performed from WebLASH.

**Keywords:** Hydrological modelling. Hydrology. Web tools.

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Esquematização das versões do LASH. ....                                                                                                                        | 18 |
| Figura 2 - Esquematização dos módulos do modelo hidrológico LASH considerando a última versão implementada em MATLAB® (M-LASH). ....                                       | 19 |
| Figura 3 - Esquematização dos conceitos hidrológicos da atual versão do modelo LASH. ....                                                                                  | 19 |
| Figura 4 – Esquema do WebLASH e seus complementos, o E-LASH e o F-LASH. .                                                                                                  | 33 |
| Figura 5 – Fluxograma e pseudocódigo do algoritmo PSO. ....                                                                                                                | 40 |
| Figura 6 - Resumo dos módulos do WebLASH condicionados às escolhas dos usuários. ....                                                                                      | 43 |
| Figura 7 – Localização e hidrografia da BHRP considerando à área de drenagem à montante da estação fluviométrica considerada no estudo. ....                               | 45 |
| Figura 8 – Interface de inicialização do WebLASH, sendo a tela de primeiro contato do usuário com o modelo. ....                                                           | 48 |
| Figura 9 – Módulos presentes no menu <i>Modelagem</i> do WebLASH. ....                                                                                                     | 49 |
| Figura 10 – Campos para inserção dos parâmetros de calibração do WebLASH quando da escolha do processamento de validação ou simulação. ....                                | 50 |
| Figura 11 – Exemplo de estruturação dos dados de vazão em formato *.txt. ....                                                                                              | 51 |
| Figura 12 – Campo para escolha da série de vazões de acordo com os arquivos correspondentes às estações fluviométricas disponíveis no banco de dados do Hidroweb/ANA. .... | 51 |
| Figura 13 – Campo para escolha do período da série de vazões da ANA a ser considerado na calibração. ....                                                                  | 52 |
| Figura 14 – Exemplo de estruturação dos dados de chuva em formato *.txt. ....                                                                                              | 53 |
| Figura 15 – Exemplo de escolha de importação dos dados do INMet para a chuva. .                                                                                            | 53 |
| Figura 16 – Exemplo de alerta quando da importação de dados de chuva que possuem registros não-numéricos. ....                                                             | 54 |
| Figura 17 – Exemplo de estruturação dos dados de temperatura em formato *.txt. .                                                                                           | 55 |
| Figura 18 – Condicionamento da evapotranspiração quando da escolha de <i>upload</i> de arquivo para as séries históricas da temperatura. ....                              | 56 |
| Figura 19 - Condicionamento da evapotranspiração quando da escolha de importação de arquivo com dados de temperatura do servidor do INMet. ....                            | 56 |
| Figura 20 – Teste dos resultados do filtro de Kalman. ....                                                                                                                 | 57 |

|                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 21 – Condicionamento dos dados de entrada referentes à bacia hidrográfica de acordo com a escolha da equação de Penman-Monteith.....                                                                                          | 58 |
| Figura 22 – Condicionamento dos dados de entrada referentes à bacia hidrográfica de acordo com a escolha da equação de Hargreaves-Samani. ....                                                                                       | 59 |
| Figura 23 – Condicionamento dos dados de entrada referentes ao IAF.....                                                                                                                                                              | 59 |
| Figura 24 – Parâmetros necessários referentes ao solo da bacia hidrográfica de interesse. ....                                                                                                                                       | 60 |
| Figura 25 – Parâmetro(s) necessário(s) referente(s) ao uso do solo da bacia hidrográfica de interesse.....                                                                                                                           | 61 |
| Figura 26 – Menu <i>material de apoio</i> .....                                                                                                                                                                                      | 63 |
| Figura 27 – Estações pluviométricas presentes na BHRP a partir da importação dos <i>shapefiles</i> no menu <i>Material de apoio</i> .....                                                                                            | 64 |
| Figura 28 – Tela de resultados da calibração da BHRP no WebLASH. ....                                                                                                                                                                | 65 |
| Figura 29 – <i>Zoom in</i> da tela de estatísticas do WebLASH. ....                                                                                                                                                                  | 66 |
| Figura 30 – <i>Zoom in</i> da tela de resultados gráficos do WebLASH.....                                                                                                                                                            | 66 |
| Figura 31 – <i>Zoom in</i> da tela de resultados dos componentes do balanço hídrico do WebLASH. ....                                                                                                                                 | 67 |
| Figura 32 – Evolução da (a) função objetivo e dos (b) parâmetros do WebLASH sob o algoritmo PSO, considerando 25 iterações para a modelagem hidrológica na BHRP. ....                                                                | 70 |
| Figura 33 – Tela de exemplo do E-LASH para a BHRP considerando a modelagem de forma semi-distribuída.....                                                                                                                            | 71 |
| Figura 34 – Exemplo de como as séries históricas de chuva, temperaturas mínimas e máximas, e os parâmetros $K_c$ , IAF e profundidade do sistema radicular devem ser compatibilizadas para a modelagem por sub-bacias no E-LASH..... | 72 |
| Figura 35 – Exemplo de como os parâmetros de latitude, altitude média, área de drenagem, tempo de concentração, $\theta_{SAT}$ , $\theta_{PMP}$ , $Z_{SOLO}$ para a modelagem por sub-bacias no E-LASH. ....                         | 73 |
| Figura 36 – Exemplo de estrutura do código <code>00_main_F-LASH</code> . ....                                                                                                                                                        | 74 |

## Sumário

|       |                                                             |    |
|-------|-------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Introdução .....                                            | 11 |
| 2     | Objetivos .....                                             | 13 |
| 2.1   | Geral.....                                                  | 13 |
| 2.2   | Específicos.....                                            | 13 |
| 3     | Revisão de literatura.....                                  | 14 |
| 3.1   | Modelos hidrológicos.....                                   | 14 |
| 3.2   | Histórico de desenvolvimento do LASH.....                   | 15 |
| 3.3   | Módulos e equacionamentos do LASH.....                      | 19 |
| 3.4   | Linguagem de programação R para modelagem hidrológica ..... | 29 |
| 4     | Metodologia .....                                           | 32 |
| 4.1   | Desenvolvimento do LASH em uma plataforma web: WebLASH..... | 32 |
| 4.2   | Simplificações e melhorias.....                             | 33 |
| 4.3   | Descritivo dos pacotes utilizados .....                     | 40 |
| 4.4   | Módulos do WebLASH .....                                    | 42 |
| 4.5   | Implementação do E-LASH e do F-LASH.....                    | 43 |
| 4.6   | Teste com o WebLASH .....                                   | 44 |
| 5     | Resultados e discussão.....                                 | 47 |
| 5.1   | Menu Início .....                                           | 47 |
| 5.2   | Menu Modelagem .....                                        | 49 |
| 5.2.1 | <b>Processamento</b> .....                                  | 50 |
| 5.2.2 | <b>Séries históricas</b> .....                              | 50 |
| 5.2.3 | <b>Bacia hidrográfica</b> .....                             | 57 |
| 5.2.4 | <b>Solo</b> .....                                           | 60 |
| 5.2.5 | <b>Uso do solo</b> .....                                    | 61 |
| 5.3   | Menu Material de apoio .....                                | 62 |
| 5.4   | Resultados do WebLASH para o estudo de caso na BHRP.....    | 64 |
| 5.5   | Destaques do E-LASH e do F-LASH.....                        | 70 |
| 5.6   | Aplicações do WebLASH, E-LASH e F-LASH.....                 | 75 |
| 6     | Conclusões .....                                            | 76 |
| 7     | Considerações finais .....                                  | 77 |
|       | Referências.....                                            | 78 |

## 1 Introdução

Nas últimas décadas, a hidrologia tem experimentado grandes avanços, especialmente devido ao desenvolvimento de recursos computacionais e à ampliação de acessos as bases de dados (SLATER *et al.*, 2019). Nessa temática, o desenvolvimento de ferramentas computacionais aplicadas aos recursos hídricos em linguagens de programação e ambientes mais amigáveis tem ganhado espaço e a atenção de pesquisadores e profissionais da área. Em meio as ferramentas utilizadas para a gestão dos recursos hídricos, os modelos hidrológicos subsidiam estudos técnicos e científicos e são amplamente utilizados em locais sem monitoramento.

Dentre os modelos hidrológicos, alguns se destacam por fornecerem bons resultados em bacias hidrográficas, como o *Limburg Soil Erosion Model* (LISEM) (DE ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996; VARGAS *et al.*, 2021), que é um modelo determinístico, conceitualmente baseado, discreto e distribuído por *grid*; e o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (ARNOLD *et al.*, 1998; SILVA *et al.*, 2023), que é um modelo determinístico, conceitualmente baseado, de longo termo e semi-distribuído por unidades de resposta hidrológica (*Hydrologic Response Units* – HRUs). No Brasil, foram desenvolvidos o Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) (COLLISCHONN, 2001; MELATI *et al.*, 2023), o MHD-INPE do Centro de Ciências do Sistema Terrestre (MELO *et al.*, 2022) e o *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH) (MELLO *et al.*, 2008; VARGAS *et al.*, 2023), os quais são modelos determinísticos, semi-conceituais, de longo tempo e semi-distribuídos.

O modelo LASH tem se destacado por sua crescente aplicabilidade no Brasil, já tendo sido avaliado em bacias hidrográficas de diferentes biomas (<https://rpubs.com/gphidrologia/baciaslash>). As principais vantagens do LASH são o pequeno número de informações de entrada e de parâmetros a serem calibrados, sendo um modelo recomendado para bacias com disponibilidade limitada de dados. Essas vantagens facilitam o desenvolvimento do modelo em um ambiente web, partindo de considerações para um processamento mais eficiente de forma *online*.

O desenvolvimento do modelo do LASH foi idealizado por pesquisadores da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Universidade Federal de Pelotas (UFPe) e Universidade de Purdue (EUA) e desde a sua concepção, possui as seguintes versões: i) 1ª versão (MELLO *et al.*, 2008): implementado em planilhas eletrônicas nas versões concentrada e semi-distribuída por sub-bacias; ii) 2ª versão (BESKOW, 2009,

BESKOW *et al.*, 2011): em linguagem de programação Delphi e modelagem distribuída por células (*grid*); iii) 3ª versão (CALDEIRA, 2016, CALDEIRA *et al.*, 2019): também em Delphi e incorporou dois módulos para tratamento da base de dados temporal e espacial; iv) M-LASH (VARGAS, 2021; VARGAS *et al.*, 2023): em MATLAB®, com o acoplamento de um algoritmo multi-objetivo, melhoria do módulo de propagação, e melhoria significativa do tempo de execução do modelo, cerca de 40 vezes mais rápido; e o v) R-LASH (MOURA, 2023): em linguagem R e testou a calibração multi-objetivo a partir de diferentes algoritmos.

A partir das versões do LASH até então desenvolvidas, esse estudo se propõe a continuar colaborando para o avanço técnico-científico do modelo, principalmente nas vertentes de: i) escrita do código, proporcionando facilidade de entendimento e rapidez de processamento; iii) utilização de uma linguagem condizente com a atualidade e que permita reproduzir o cerne do modelo, tal como a linguagem de programação R; iii) foco na geração de um produto que priorize o público não *expert* em programação, mas com formação e/ou atuação na área de hidrologia; v) implementação de um modelo concentrado, em um ambiente web, condizente com as necessidades de aplicação para a área de consultoria, *e.g.* modelagem hidrológica para gestão de recursos hídricos, disponibilidade hídrica, preenchimento de falhas etc, e ensino no âmbito da graduação e pós-graduação. Desta forma, buscando preencher as lacunas de modelos hidrológicos com uma interface simples, a ideia é simplificar o LASH para que seu uso seja expandido por profissionais da área. Embora a ideia seja facilitar a utilização do modelo, destaca-se que é uma ferramenta que requer conhecimentos de hidrologia e modelagem para interpretação dos resultados.

O potencial do R para conceber um modelo hidrológico é muito grande, permitindo, para usuários menos familiarizados com programação, a alternativa de criar um aplicativo web; ao passo que para usuários que possuam aptidão com códigos, é possível criar conjuntos de funções que podem se tornar um pacote ou ainda, simplesmente rodar o aplicativo de forma local por meio de um executável. As versões em funções/pacote e executável podem ser acrescidas de opções que fariam inviáveis de serem computadas de forma web, como a modelagem semi-distribuída, por exemplo.

## 2 Objetivos

### 2.1 Geral

Implementação do modelo hidrológico LASH em uma plataforma web via linguagem de programação R, considerando a modelagem concentrada, a simplificação de alguns módulos e dois complementos: um conjunto de funções para usuários programadores e um executável para utilizar o modelo localmente; facilitando a integração de profissionais da área nos ramos técnico-científico-acadêmico, *e.g.* consultoria e ensino em disciplinas de graduação e pós-graduação.

### 2.2 Específicos

Os objetivos específicos são:

- i. Simplificar o LASH a partir da supressão de algumas variáveis e módulos, mantendo a eficiência do modelo;
- ii. Otimizar, por meio de bibliotecas e pacotes disponíveis, a integração de bancos de dados de séries temporais com o LASH;
- iii. Implementar o LASH, concentrado para a bacia hidrográfica, em uma plataforma web (WebLASH);
- iv. Desenvolver dois complementos do WebLASH acrescidos da opção de modelagem semi-distribuída: o executável para computar o modelo localmente (E-LASH) e um conjunto de funções em R (F-LASH).
- v. Testar a implementação do WebLASH em uma bacia hidrográfica previamente utilizada em outras versões do modelo.

### 3 Revisão de literatura

#### 3.1 Modelos hidrológicos

De acordo com Beskow *et al.* (2011), a modelagem hidrológica tem sido utilizada para quantificar o impacto de cenários de uso do solo e mudanças climáticas nos recursos hídricos, nesse sentido, os modelos podem ser ferramentas poderosas para realizar previsões e a gestão hídrica.

Em suma, os modelos hidrológicos podem ser classificados sob diferentes critérios, sendo (RENNÓ; SOARES, 2007): as variáveis utilizadas na modelagem (estocástico ou determinístico); o tipo de relações entre essas variáveis (empírico ou conceitual); a forma de representação dos dados (discreto ou contínuo); a existência ou não de relações espaciais (concentrado ou distribuído); e a existência de dependência temporal (estacionário ou dinâmico). De acordo com Caldeira *et al.* (2018), as explicações dessas classificações são:

- Estocástico: quando o modelo emprega distribuições de probabilidade para gerar séries temporais de variáveis hidrológicas; e Determinístico: transforma a chuva em vazão através do quantitativo dos processos físicos que ocorrem na bacia;
- Empírico: quando as funções empregadas para representar o comportamento do sistema levam em consideração os processos físicos; e Conceitual: não levam em consideração os processos físicos;
- Discreto: baseado em eventos, em que a modelagem ocorre por períodos isolados da série histórica, buscando representar, por exemplo, eventos de cheias ou recessão; e Contínuo: modelagem de longos períodos, contemplando diferentes comportamentos hidrológicos dentro de um ano hidrológico;
- Concentrado: os parâmetros, as entradas e as saídas são valores médios únicos que representam a bacia em sua totalidade; e Distribuído: leva em consideração a variabilidade espacial dos parâmetros, entradas e saídas; e quando distribuído em sub-bacias, o modelo é denominado como semi-distribuído;



- Estacionário: sem variação temporal dos parâmetros; e Dinâmico: os parâmetros variam em função do tempo (dependência temporal).

Com relação à distinção dos modelos concentrados e semi-distribuídos, é interessante destacar suas diferenças também em termos de propagação de vazões. A abordagem do cálculo de propagação de cheias nos canais possui sentido físico em modelos semi-distribuídos, cujos tempos de concentração das sub-bacias sejam inferiores ao tempo da onda de deslocamento da onda cheia até o exutório da sub-bacia. Além disso, para computar a propagação é necessário considerar os trechos entre sub-bacias que conduzem a onda de cheia. Logo, o modelo concentrado não possui módulo de propagação, pois o tempo da concentração da bacia é, em geral, superior ao tempo de deslocamento da onda de cheia e ainda, o trecho que recebe a onda de cheia só existe no exutório da bacia.

### 3.2 Histórico de desenvolvimento do LASH

Em sua 1ª versão (MELLO *et al.*, 2008) o LASH foi implementado de forma semi-distribuída (sub-bacias), em arquivos de planilhas eletrônicas, havendo alguns testes de forma concentrada (bacia). Nesta versão a calibração era realizada via ferramenta *solver* (KEMMER; KELLER, 2010), e necessitava de valores iniciais muito próximos da realidade dos parâmetros do modelo para que a otimização fosse computada com sucesso. Além disso, as planilhas ocupavam muita memória dos computadores da década, o que ocasionava demora na manipulação das informações. Na 2ª versão (BESKOW, 2009; BESKOW *et al.*, 2011), o modelo foi estruturado em linguagem de programação Delphi por meio de um *Graphical User Interface* (GUI), oferecendo uma interface para modelagem distribuída (*grid*), e contou com o acoplamento do algoritmo genético mono-objetivo *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992) para a calibração automática dos parâmetros.

As duas primeiras versões do modelo possibilitaram um estudo mais avançado, principalmente em relação ao passo espacial da modelagem (concentrada *versus* semi-distribuída *versus* distribuída). Desta forma, a 3ª versão (CALDEIRA, 2016; CALDEIRA *et al.*, 2019) foi implementada de forma semi-distribuída por sub-bacias e não mais distribuída, haja vista os resultados apresentados em Caldeira *et al.* (2019).

Além disso, foi possível explorar dois módulos para tratamento de banco de dados temporal e espacial, sendo estes, respectivamente, o *System of Hydrological Data Acquisition and Analysis* (SYHDA) (VARGAS *et al.*, 2019) e o ArcLASH (SANTOS *et al.*, 2019). Nesta versão, o modelo ainda era em Delphi, mas foi implementado em C++ apenas para testes computacionais, não resultando em um versionamento.

A partir da 3ª versão, o LASH deixou de ser denominado de acordo com a ordem de desenvolvimento, passando a ser denominado de acordo com o ambiente de programação no qual foi desenvolvido, sendo o caso do LASH em MATLAB® (M-LASH) (VARGAS *et al.*, 2023). O M-LASH trouxe melhorias computacionais e hidrológicas muito interessantes para o modelo, sendo estas:

- i. A melhoria do módulo de propagação de vazões em rios, a qual antes era considerando o método de Muskingum-Cunge Linear (CUNGE, 1969) (todas as versões) e passou a considerar a Onda Cinemática (LIGHTHILL; WHITHAM, 1955a, 1955b), inserindo um componente mais hidráulico ao modelo e um parâmetro de calibração (n de Manning);
- ii. O acoplamento a um algoritmo multiobjetivo, *A Multi-Algorithm Genetically Adaptive Multiobjective* (AMALGAM) (VRUGT; ROBINSON, 2007);
- iii. A melhoria significativa no tempo de calibração do LASH (cerca de 40 vezes mais rápido); e
- iv. A possibilidade, devido ao tempo de calibração, de testar a calibração de todos os parâmetros de forma distribuída, algo inédito no modelo até então; exemplo: para uma bacia com 47 sub-bacias e os 7 parâmetros do M-LASH, foi possível calibrar 376 parâmetros em 35h, tempo este que levaria para calibrar as mesmas sub-bacias nas versões anteriores).

O M-LASH foi registrado junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) e se encontra em processo de difusão para uso interno no Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas/CNPq. Os resultados obtidos dessa implementação dão margem para continuar com o viés de exploração do modelo, principalmente para que todos os profissionais da área de recursos hídricos, além da academia, possam usufruir do modelo.

O R-LASH (MOURA, 2023) foi implementado em R a partir do código da 3ª versão e testou diversos algoritmos multi-objetivos e suas diferenças na calibração

dos parâmetros do modelo, comprovando a eficiência do modelo sob a ótica de diferentes formulações matemáticas de calibração.

A Figura 1 elucida, de forma resumida e visual, as versões do LASH até o momento, considerando também a proposta de desenvolvimento deste trabalho.

## Histórico do Lavras Simulation of Hydrology (LASH)

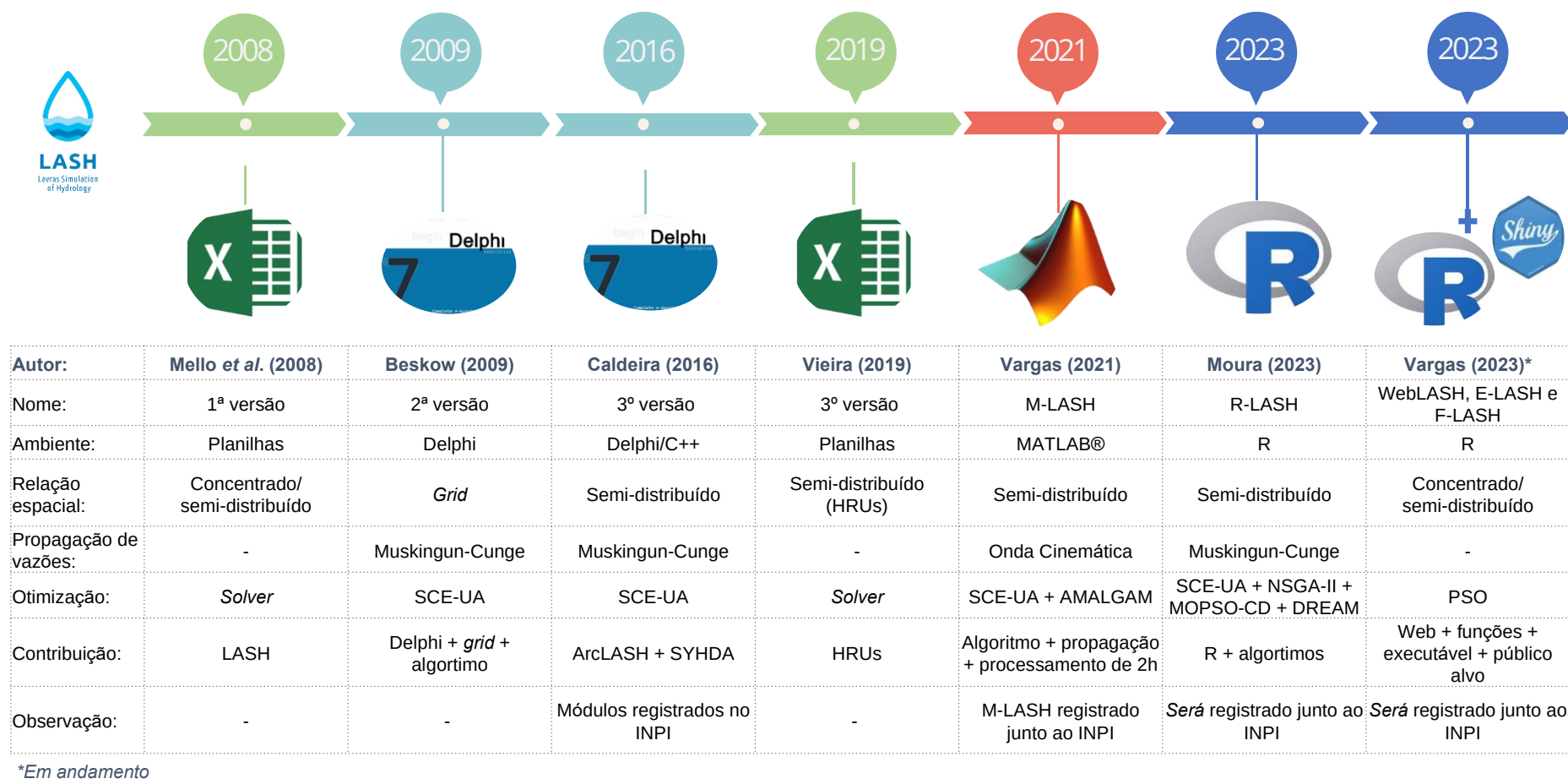


Figura 1 - Esquematização das versões do LASH.

### 3.3 Módulos e equacionamentos do LASH

A seguir são expostos os módulos do LASH considerando a versão do M-LASH, tendo como unidade espacial de análise a sub-bacia hidrográfica e o passo de simulação diário (Figura 2), sendo que as características de sua tipologia está representada na Figura 3. A diferença do M-LASH em relação as versões anteriores e posterior (R-LASH), é o equacionamento do módulo 3, sendo que os módulos 1 e 2 concernem na base da modelagem hidrológica do LASH e o tempo de processamento.

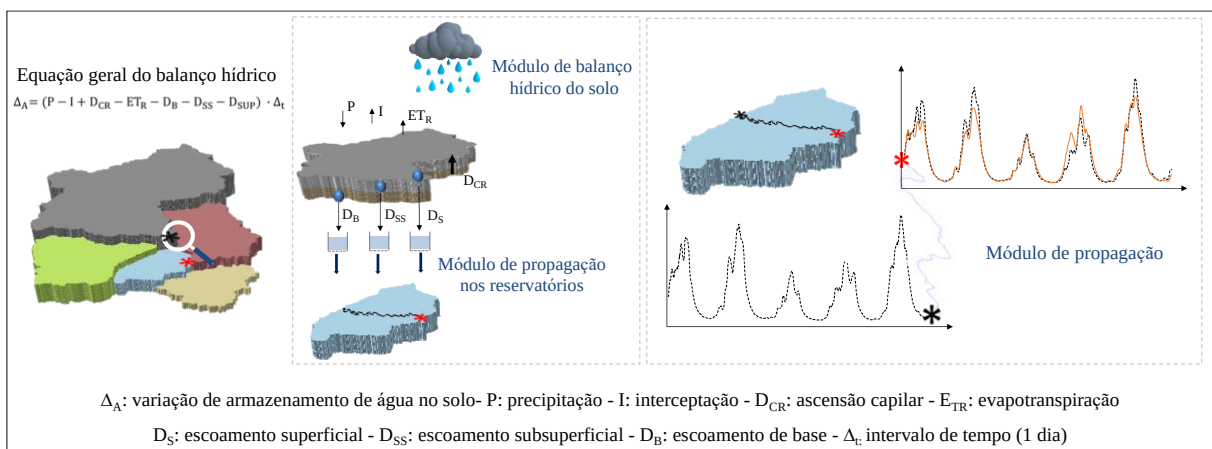


Figura 2 - Esquematização dos módulos do modelo hidrológico LASH considerando a última versão implementada em MATLAB® (M-LASH). Fonte: Adaptado de Vargas *et al.* (2023).

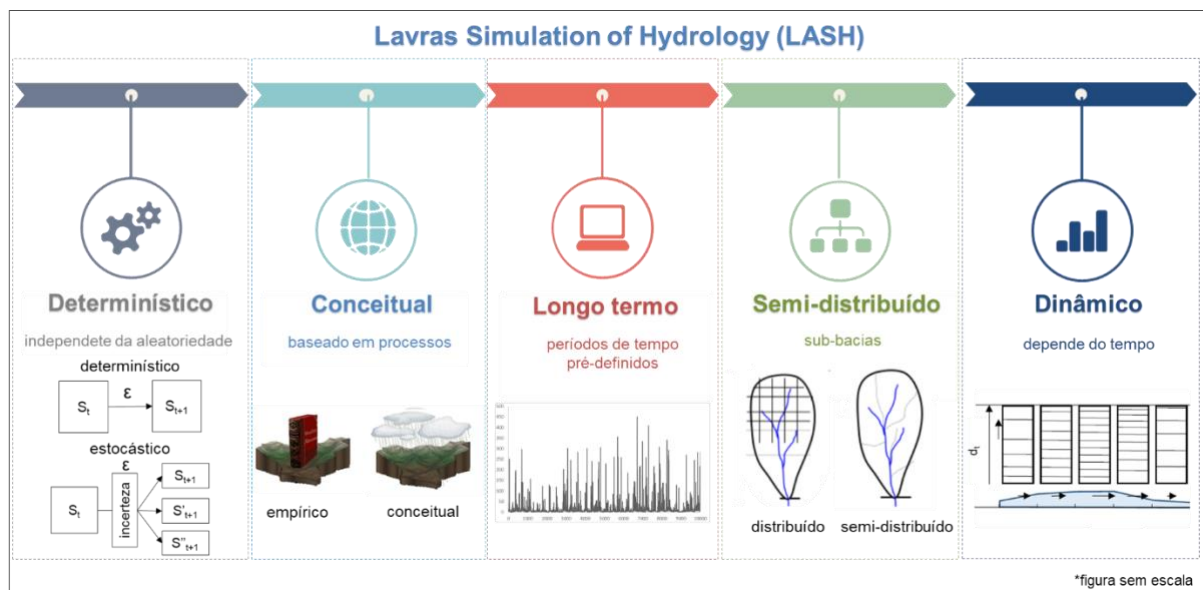


Figura 3 - Esquematização dos conceitos hidrológicos da atual versão do modelo LASH.

Fonte: Vargas (2021).

### Módulo 1: balanço hídrico do solo

Os processos físicos simulados pelo modelo são baseados na equação do balanço hídrico (Equação 1), tendo-se uma camada de controle para este balanço, considerando a sub-bacia hidrográfica como discretização espacial e o intervalo diário de simulação. O armazenamento de água no solo é uma variável essencial para a simulação hidrológica, pois exerce influência na evapotranspiração e na geração de escoamento superficial direto, escoamento subsuperficial e fluxo de base (CALDEIRA *et al.*, 2019).

$$\frac{A_t - A_{t-1}}{\Delta t} = \frac{P + D_{CR} - ET_R - D_B - D_{SS} - D_{SUP}}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 1})$$

em que  $A_t$  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  $t$ ,  $\Delta t$  é o intervalo de tempo, igual a um dia,  $P$  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 o escoamento de base (mm),  $D_{SS}$  é o escoamento subsuperficial (mm) e  $D_S$  é o escoamento superficial direto (mm).

Após o início da precipitação, essa é armazenada na cobertura vegetal até que seja atingido o armazenamento máximo de interceptação. O modelo estima a capacidade do reservatório de interceptação (CRI) de cada sub-bacia hidrográfica a partir da Equação 2. Nesse sentido, a interceptação está intrínseca à precipitação na equação do balanço hídrico.

$$CRI = \alpha \cdot IAF \quad (\text{Eq. 2})$$

em que CRI é a capacidade do reservatório de interceptação (mm),  $\alpha$  é a capacidade máxima de armazenamento de água por unidade de área das folhas, considerada 0,2 mm no *default* do modelo (BESKOW *et al.*, 2011) e IAF, o índice de área foliar ( $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ).

Determinada a CRI para cada sub-bacia, o modelo realiza o balanço hídrico no reservatório de interceptação e estima a parcela da lâmina de precipitação que atingiu o solo no tempo  $t$ . O esvaziamento deste reservatório ocorre com a evaporação.

Para representar situações em que algumas áreas da bacia hidrográfica apresentam baixa disponibilidade de água no solo, o componente da capilaridade ( $D_{CR}$ ) foi incluído no modelo LASH. Quando  $A_t$  é inferior ao armazenamento limite ( $A_{CR}$ ) para ocorrer fluxo de água por ascensão capilar, a Equação 3 é utilizada.

$$D_{CR} = K_{CAP} \left( \frac{A_{CR} - A_t}{A_{CR}} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

em que  $D_{CR}$  é a ascensão capilar ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ),  $K_{CAP}$  é o fluxo máximo retornado ao solo por ascensão capilar ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ),  $A_t$  é o armazenamento atual de água no solo (mm) e  $A_{CR}$  o armazenamento limite para ocorrer ascensão capilar (mm).

No tocante ao módulo da evapotranspiração, este foi fundamentado em dados meteorológicos normalmente disponíveis para aplicação da equação de Penman-Monteith (Equação 4) (ALLEN *et al.*, 1998) para estimativa de uma série histórica de evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ).

$$ET_c = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \left( \frac{86400 \cdot \gamma \cdot \varepsilon}{T_{Kv} \cdot R \cdot r_a} \right) \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (\text{Eq. 4})$$

em que  $ET_c$  é a evapotranspiração da cultura (mm),  $\Delta$  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 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ),  $e_a$  a pressão atual do vapor d'água (kPa),  $e_s$  a pressão de saturação do vapor d'água (kPa),  $G$  é o fluxo de energia para o solo ( $\text{M} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ), considerado nulo,  $\gamma$  a constante psicrométrica ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\varepsilon$  uma razão do peso molecular do vapor d'água/ar seco (0,622, adimensional),  $T_{Kv}$  a temperatura virtual (K),  $R$  a constante de gás específico ( $0,287 \text{ KJ kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $r_a$  a resistência aerodinâmica ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ) e  $r_s$  a resistência estomatal ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

As equações subsequentes comportam as inter-relações entre as variáveis presentes na Equação 11 e estão descritas em Allen *et al.* (1998).

A declividade da curva de pressão de saturação da água ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ), é dada por:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left[ 0,6108 \cdot \exp \left( \frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3} \right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (\text{Eq. 5})$$

em que  $T$  é a temperatura média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ).

A radiação líquida ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) é expressa pela Equação 6 e suas componentes, nas Equações 7, 8 e 9.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$R_{ns} = (1 - a) \cdot R_s \quad (\text{Eq. 7})$$

Se  $R_s \leq R_{so}$ , então  $R_{nl}$ :

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left( \frac{T_{\text{máx},K}^4 + T_{\text{mín},K}^4}{2} \right) \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left( 1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,34 \right) \quad (\text{Eq. 8})$$

Se  $R_s > R_{so}$ , então  $R_{nl}$ :

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left( \frac{T_{\text{máx},K}^4 + T_{\text{mín},K}^4}{2} \right) \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \quad (\text{Eq. 9})$$

em que  $R_{ns}$  é a radiação de ondas curtas ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ),  $R_{nl}$  é a radiação de ondas longas ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ),  $a$  é o albedo,  $R_s$  a radiação solar incidente ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ),  $\sigma$  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),  $R_{so}$  a radiação de ondas curtas que ocorre quando não há nuvens no céu ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ).

Os componentes  $e_a$  (kPa),  $e_s$  (kPa),  $R_{so}$  ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) são computados por:

$$e_a = \frac{e_s \cdot UR}{100} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$e_s = \frac{\left[ 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{\text{mín}}}{T_{\text{máx}} + 237,3}\right) \right] + \left[ 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{\text{máx}}}{T_{\text{mín}} + 237,3}\right) \right]}{2} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$R_{so} = [0,75 \cdot (0,00002 \cdot z)] \cdot R_a \quad (\text{Eq. 12})$$



em que  $U_R$  é a umidade relativa média do dia (%),  $T_{\min}$  é a temperatura mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{\max}$  é 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 ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ).

A radiação que atinge o topo da atmosfera ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) e suas componentes são dadas por:

$$R_a = \frac{(24 \cdot 60)}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [\omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s)] \quad (\text{Eq. 13})$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot J\right) \quad (\text{Eq. 14})$$

$$\omega_s = \arcsin[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (\text{Eq. 15})$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot J - 1,39\right) \quad (\text{Eq. 16})$$

em que  $G_{sc}$  é a constante solar ( $0,0820 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ ),  $d_r$  é a distância relativa inversa Terra-Sol (adimensional),  $\omega_s$  o ângulo horário ao nascer ou pôr do sol (radianos),  $\varphi$  é a latitude (radianos),  $\delta$  é a declinação solar (radianos) e  $J$  é o número do dia no calendário Juliano.

A constante psicrométrica ( $\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), presente na Equação 4, e os componentes de seu cálculo são dados por:

$$\gamma = 0,000665 \cdot P \quad (\text{Eq. 17})$$

$$P = 101,3 \cdot \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293}\right)^{5,26} \quad (\text{Eq. 18})$$

em que  $P$  é a pressão atmosférica ( $\text{kPa}$ ).

Quanto aos componentes relacionados à resistência aerodinâmica ( $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ) e à resistência estomatal ( $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ), as seguintes Equações foram utilizadas:

Se altura da vegetação ( $h$ )  $\leq 10$  m, então  $r_a$ :

$$r_a = \frac{6,25}{U_{10}} \cdot \left[ \text{LN} \left( \frac{10}{h/10} \right) \right]^2 \quad (\text{Eq. 19})$$

Se altura da vegetação  $h > 10$  m, então  $r_a$ :

$$r_a = \frac{94}{U_{10}} \quad (\text{Eq. 20})$$

$$U_{10} = v_{\text{emp}} \cdot \frac{\text{LN} \left( \frac{10}{h/10} \right)}{\text{LN} \left( \frac{2}{h/10} \right)} \quad (\text{Eq. 21})$$

em que  $U_{10}$  é a velocidade do vento a 10 m da superfície ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $v$  é a velocidade do vento média diária ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $v_{\text{emp}}$  é a velocidade do vento empregada ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), a qual foi calculada seguindo as Equações 22 ou 23.

Se a altura da estação meteorológica, a partir da superfície do terreno (m) –  $h_{\text{estação}} = 2$  m, então  $v_{\text{emp}}$ :

$$v_{\text{emp}} = v \quad (\text{Eq. 22})$$

Se a altura da estação meteorológica, a partir da superfície do terreno ( $h_{\text{estação}}$ , em m) for diferente de 2 m, então  $v_{\text{emp}}$ :

$$v_{\text{emp}} = \frac{v}{4,87 / \text{LN}[(67,8 \cdot h_{\text{estação}}) - 5,42]} \quad (\text{Eq. 23})$$

Se a umidade do solo for menor que um determinado limite de disponibilidade de água no solo, a evapotranspiração real ( $ET_R$ ) será menor ou igual à  $ET_C$ . Nesse sentido, a relação  $ET_C$  e  $ET_R$  pode ser realizada por meio do coeficiente de estresse hídrico ( $K_S$ ).

$$ET_R = ET_C \cdot K_S \quad (\text{Eq. 24})$$

$$K_S = \frac{\ln(A_t - A_{PMP})}{\ln(A_L - A_{PMP})} \text{ se } A_t < A_L \text{ ou } K_S = 1 \text{ se } A_t \geq A_L \quad (\text{Eq. 25})$$

em que  $K_S$  é um coeficiente adimensional que representa um decaimento exponencial da relação  $ET_R/ET_C$  a partir de um armazenamento limite de água no solo ( $A_L$ ),  $A_L$  é o armazenamento limite a partir do qual ocorre decréscimo da evapotranspiração (mm), e  $A_{PMP}$  é o armazenamento de água no solo no ponto de murcha permanente (mm).

O escoamento superficial direto ( $D_S$ ) corresponde à fração de chuva que não é interceptada, armazenada nas micro depressões ou infiltrada. O modelo LASH simula esse processo por meio do método Curva-Número (CN) (*Soil Conservation Service*, 1971) modificado por Mishra *et al.* (2003).

$$D_S = \frac{(P_t - I_a) \cdot (P_t - I_a + M)}{P_t - I_a + M + S} \quad (\text{Eq. 26})$$

$$M = 0,5 \cdot [-(1 + \lambda) \cdot S] + \sqrt{(1 - \lambda)^2 \cdot S^2 + 4 \cdot P_5 \cdot S} \quad (\text{Eq. 27})$$

$$I_a = \frac{\lambda \cdot S^2}{S + M} \quad (\text{Eq. 28})$$

$$S = (\theta_s - \theta_A) \cdot h \quad (\text{Eq. 29})$$

$$S = A_m - A_t \quad (\text{Eq. 30})$$

em que  $D_S$  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 ( $\theta_s$ ) e o conteúdo atual de água no solo ( $\theta_A$ ), podendo ser estimado pelas Equações 9 ou 10,  $h$  é a espessura (profundidade do solo) da camada de controle do balanço hídrico (mm), definida com base na profundidade média do sistema radicular da cobertura vegetal, e  $\lambda$  é o coeficiente de abstração inicial.

As parcelas de escoamento subsuperficial ( $D_{SS}$ ) e do escoamento de base, ou escoamento subterrâneo ( $D_B$ ) são simuladas pelo LASH seguindo recomendações de Rawls *et al.* (1993) para o fluxo em meios porosos.

$$D_{ss} = K_{ss} \cdot \left( \frac{A_t - A_{cc}}{A_m - A_{cc}} \right)^{\left(3 + \frac{2}{P_r}\right)} \text{ se } A_t \geq A_{cc} \text{ ou } D_{ss} = 0 \text{ se } A_t < A_{cc} \quad (\text{Eq. 31})$$

$$D_B = K_B \cdot \left( \frac{A_t - A_c}{A_m - A_c} \right) \text{ se } A_t \geq A_c \text{ ou } D_B = 0 \text{ se } A_t < A_c \quad (\text{Eq. 32})$$

em que  $D_{ss}$  é o escoamento subsuperficial ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ),  $K_{ss}$  é a condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ),  $P_r$  é o índice de porosidade do solo e  $A_{cc}$  representa o armazenamento de água no solo a partir do qual ocorre escoamento subsuperficial (mm),  $D_B$  é o escoamento subterrâneo ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ),  $K_B$  é a condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ), e  $A_c$  representa o armazenamento de água no solo a partir do qual ocorre escoamento subterrâneo (mm).

## Módulo 2: propagação nos reservatórios

Após o equacionamento de  $D_s$ ,  $D_{ss}$  e  $D_B$ , o modelo converte as lâminas de escoamento em vazões, considerando três reservatórios lineares (superficial, subsuperficial e subterrâneo) e um determinado tempo de permanência da água para o armazenamento em cada sub-bacia.

$$Q_s = \frac{D_s \cdot A_{\text{sub-bacia}}}{C_s \cdot T_c} = \frac{V_s}{C_s \cdot T_c} \quad (\text{Eq. 33})$$

$$Q_{ss} = \frac{D_{ss} \cdot A_{\text{sub-bacia}}}{C_{ss} \cdot T_c} = \frac{V_{ss}}{C_{ss} \cdot T_c} \quad (\text{Eq. 34})$$

$$Q_B = \frac{D_B \cdot A_{\text{sub-bacia}}}{C_B} = \frac{V_B}{C_B} \quad (\text{Eq. 35})$$

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

Os volumes  $V_S$ ,  $V_{SS}$  e  $V_B$  se referem aos volumes de água que permanecem no reservatório após em cada intervalo de tempo e são atualizados a cada intervalo de tempo. Cabe ressaltar que  $C_S \cdot T_C$  é menor que  $C_{SS} \cdot T_C$ , devido a um tempo de residência diferente em cada reservatório (BESKOW; MELLO; NORTON, 2011).

### **Módulo 3: propagação do escoamento na rede de drenagem**

A equação de implementação do esquema não linear da Onda Cinemática parte da forma finita da combinação das equações da continuidade e do momento, considerando o rearranjo dos termos, conforme a Equação 36.

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_{i+1}^{j+1} + \alpha (Q_{i+1}^{j+1})^\beta = \frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha (Q_{i+1}^j)^\beta \quad (\text{Eq. 36})$$

em que  $Q$  é a vazão,  $\Delta x$  é o incremento associado ao trecho a ser propagado,  $A$  é a área,  $\Delta t$  é o intervalo de temporal, e  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros do alcance da propagação de acordo com as Equações 37 e 38.

$$\alpha = \frac{1}{n} \frac{S_0^{2/3}}{B^{2/3}} \quad (\text{Eq. 37})$$

$$\beta = \frac{5}{3} \quad (\text{Eq. 38})$$

Em que  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning,  $S_0$  é a inclinação da seção,  $B$  é a largura da seção.

Outrossim, este módulo é aplicado aos trechos que recebem vazões de montante e transportam as mesmas a jusante.

### **Parâmetros de calibração**

O modelo hidrológico LASH possui, na versão desenvolvida M-LASH, 8 parâmetros de calibração, sendo: o coeficiente de abstração inicial ( $\lambda$ ); a condutividade hidráulica do reservatório subsuperficial ( $K_{SS}$ ); a condutividade hidráulica do reservatório subterrâneo ( $K_B$ ); a densidade de fluxo máxima para retorno por ascensão capilar ( $K_{CAP}$ ); e o coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ). Este último foi adicionado ao modelo por meio do módulo de propagação. Nas demais versões, o

modelo trabalha com 7 parâmetros, excluindo o coeficiente de rugosidade de Manning (n).

### Análise de desempenho

O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) (Equação 39), o coeficiente de Nash-Sutcliffe na sua versão para valores logaritimizados (NSE<sub>LOG</sub>) (Equação 40), a raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Equação 41) e o percentual de viés (PBIAS) (Equação 42) são comumente utilizados para conduzir a análise de desempenho da calibração do modelo LASH.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_t} - Q_{est_t})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_t} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (\text{Eq. 39})$$

$$NSE_{LOG} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{obs_t}) - \log(Q_{est_t}))^2}{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{obs_t}) - (\log \overline{Q_{obs}}))^2} \quad (\text{Eq. 40})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (Q_{obs_t} - Q_{est_t})^2} \quad (\text{Eq. 41})$$

$$P_{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_t} - Q_{est_t})}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_t})} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 42})$$

em que  $Q_{obs_t}$  é a vazão observada no tempo  $t=i$ ,  $Q_{est_t}$  é a vazão estimada no tempo  $t=i$ ,  $\overline{Q_{obs}}$  é a vazão média observada,  $\overline{Q_{est}}$  é a vazão média estimada e N é o número de ordenadas do hidrograma.

O NSE permite analisar o comportamento do hidrograma ao longo do tempo e ainda, segundo Guilhon e Rocha (2007), verifica quantitativamente a eficiência do modelo para estimativas nos períodos de cheia, ou seja, quando se observam vazões elevadas. Quanto ao NSE<sub>LOG</sub>, o coeficiente possibilita verificar a capacidade do modelo em estimar vazões de estiagem. Deste modo, é inerente a utilização do NSE em conjunto com o NSE<sub>LOG</sub> (BESKOW, 2009). No tocante ao RMSE, esse foi escolhido seguindo recomendações de Legates e McCabe Jr. (1999), que indicam adicionar às métricas de desempenho uma estatística de índice de erro absoluto com

informações adicionais. O RMSE estima a variância residual, que é a diferença entre os valores medidos e os estimados (MORIASI *et al.*, 2007).

Uma das desvantagens do NSE é a impossibilidade de identificar o viés do modelo (MORIASI *et al.*, 2015), para tal o PBIAS pode ser empregado. O valor ideal do PBIAS é 0, o que indica a simulação precisa do modelo, e valores positivos indicam superestimativa e valores negativos. O PBIAS avalia erros no balanço hídrico com capacidade para identificar, caso haja, baixo desempenho do modelo (MORIASI *et al.*, 2007).

Em suma, de acordo com Althoff e Rodrigues (2021), a estatística NSE é recomendada para análise vazões mínimas ou máximas, no entanto tende a ser mais sensível aos picos; o  $NSE_{LOG}$  é recomendado para a avaliação de vazões mínimas, pois reduz a variabilidade dos dados; e o RMSE, dá peso aos erros, pois é um erro com a unidade do resultado que está sendo analisado; e o PBIAS pode indicar se os resultados foram sub ou superestimados.

Quanto às classificações das estatísticas, tem-se (MORIASI *et al.*, 2007; KOUCHI *et al.*, 2017; SINGH *et al.*, 2005): i)  $NSE > 0,65$ , muito bom;  $0,54 < NSE < 0,65$ , bom; e  $0,50 < NSE < 0,54$ , satisfatório; ii)  $|PBIAS| < 10\%$ , muito bom;  $10\% \leq |PBIAS| < 15\%$ , bom;  $15\% \leq |PBIAS| < 25\%$ , satisfatório; e  $|PBIAS| \geq 25\%$ , insatisfatório; e iii) o RMSE pode ser avaliado em comparação com o desvio padrão (DP) dos dados observados. De modo que podem ser considerados baixos valores de RMSE aqueles menores que a metade do DP dos dados observados. Os limites das estatísticas supracitadas são: NSE ( $-\infty$  a 1];  $NSE_{LOG}$  ( $-\infty$  a 1], RMSE [0 a  $+\infty$ ) e PBIAS ( $-\infty$  a  $+\infty$ ).

### 3.4 Linguagem de programação R para modelagem hidrológica

Algumas linguagens de programação interpretadas, tais como R (R Core Team, 2017), MATrix LABoratory (MATLAB®, 2017) e Python, dispõem de uma ampla gama de bibliotecas contendo funcionalidades de propósito geral e aplicadas, as quais podem ser facilmente integradas a rotinas computacionais hidrológicas.

A linguagem de programação R possui código aberto (IHAKA; GENTLEMAN, 1996), foi derivada da linguagem S (BECKER *et al.*, 1985) e da *Scheme* (STEEL; SUSSMAN, 1975) e possui funcionalidades podem ser estendidas por pacotes. Embora tenha sido desenvolvida para computação estatística, ao longo dos últimos

anos o R teve escopo estendido ao campo de visualização, análise e modelagem de dados ambientais (HORSBURGH; REEDER, 2014). De acordo com Soetaert e Meysman (2012), a grande vantagem do R é que, além de ser uma linguagem de programação, é também um ambiente de *software* com grande variedade de técnicas computacionais, tais como modelagem linear e não-linear, análise de séries temporais e testes estatísticos. O R é mundialmente aceito e tem sido cada mais usado nas engenharias, com destaque especial para a hidrologia. Há uma comunidade crescente de usuários e uma grande variedade de documentação, tutoriais, manuais e plataformas de discussão *on-line* que foram desenvolvidas pela comunidade R-Hydro, como o CRAN *Hydrology Task View* sobre dados hidrológicos e modelagem (ASTAGNEAU *et al.*, 2021).

Dentre os ambientes de desenvolvimento integrados (*integrated development environment* – IDE) disponíveis para o R, destaca-se o RStudio (RACINE, 2012). O RStudio permite a manipulação do código à parte do módulo de processamento e está integrado com o principal repositório do R, o que facilita a utilização de pacotes já desenvolvidos, sem que os desenvolvedores tenham que copiar ou (re)desenvolver a funcionalidade necessária.

A título de exemplo de integração do R com a hidrologia, tem-se o pacote `airGRteaching` (DELAIGUE *et al.*, 2021), que é baseado no pacote `airGR` (CORON *et al.*, 2021), sendo um conjunto de modelos chuva-vazão e de acordo com Delaigue *et al.* (2018), oferece uma interface web para aprimorar o ensino de modelos hidrológicos. Diversos outros pacotes estão disponíveis no CRAN, repositório oficial do R, especificamente no [link](#), destacando: i) o `dynatopmodel` (METCALFE; BEVEN; FREER, 2018) o qual é o aprimoramento do modelo hidrológico semi-distribuído *Dynamic TOPMODEL*; ii) o `HBV.IANIGLA` (TOUM, 2021), o qual contém modelo hidrológico de HBV, mas em módulos, permitindo ao usuário construir seu próprio modelo de HBV; iii) o `RHMS` (ARABZADEH; ARAGHINEJAD, 2019), sendo um sistema de modelagem que permite simular e analisar eventos chuva-vazão; iv) `SWATmodel` (FUKA *et al.*, 2014), que é um pacote que permite que o modelo SWAT seja executado como uma função, e ainda, o `SWATplusR` (Schürz, 2019) que integra seus projetos SWAT2012 e SWAT+ em fluxos de trabalho de modelagem; e v) o `VICmodel` e o `VIC5` (ZHONG *et al.*, 2022), os quais são a implementação do modelo de Capacidade de Infiltração Variável (VIC) e foi baseado no código de Hamman *et al.* (2018).



Apesar de serem pacotes de alto nível de desenvolvimento no contexto de modelos hidrológicos, ainda dependem de conhecimentos prévios sobre programação e sintaxe do R por parte do usuário, o que acaba dificultando a utilização desses modelos e impedindo que algumas metodologias da hidrologia sejam utilizadas por profissionais da área. Nesse sentido, uma forma de prover a utilização de pacotes como os exemplificados sem a necessidade de conhecimento em linguagens de programação, é a implementação destes em uma plataforma web, algo que é passível de ser realizado no R via biblioteca `shiny` (CHANG *et al.*, 2022) e suas derivadas.

## 4 Metodologia

### 4.1 Desenvolvimento do LASH em uma plataforma web: WebLASH

Dentre as vantagens de utilização da linguagem R, pode-se destacar: i) ser um ambiente de acesso livre e aberto, eximindo os usuários de adquirirem licenças; ii) a sintaxe acessível, facilitando a programação do modelo; iii) uma gama de bibliotecas para otimização; e iv) a possibilidade de integração com a web, facilitando a atualização e o acesso ao modelo em qualquer lugar do mundo, bem como a possibilidade de gerar um pacote para usuários de programação e, também, a possibilidade de gerar um executável.

Frente ao exposto e para dar sentido às possibilidades de usuários do LASH, o WebLASH foi implementado em ambiente web a partir da utilização da biblioteca *shiny* (CHANG *et al.*, 2022), considerando a calibração de forma concentrada para a bacia hidrográfica. Além disso, dois complementos foram implementados: i) o E-LASH: um executável do WebLASH para usuários pouco familiarizados com programação, dispondo da opção de modelagem concentrada e semi-distribuída por sub-bacias; e o ii) F-LASH: um conjunto de funções para usuários da linguagem de programação R a partir de um *template*, também dispondo da opção de modelagem concentrada e semi-distribuída por sub-bacias.

Embora possa parecer um retrocesso frente ao histórico de desenvolvimento do modelo, pois não é possível levar em consideração a heterogeneidade da bacia, a calibração de forma concentrada viabiliza o tempo disponível para o processamento do modelo, que para a área de consultoria, em geral, é reduzido. Além disso, caso o usuário necessite de um modelo com maior discretização espacial, é possível utilizar o WebLASH de forma preliminar para verificar a aderência do modelo à bacia de estudo, pré-visualizar os resultados e, posteriormente, utilizar o E-LASH para computador a modelagem por sub-bacias. A idealização do E-LASH ocorreu da necessidade de apresentar o WebLASH com a opção de calibrar o modelo por sub-bacias, algo que seria inviável, em termos de tempo de processamento, na forma web, considerando o tempo médio de processamento e a dependência da estabilidade do servidor.

Nesse sentido, o WebLASH e seus complementos abrangem praticamente todos os potenciais usuários de modelos hidrológicos na área de consultoria e ensino,

além de usuários programadores que possuam formação em hidrologia. Vale destacar que, em termos de metodologia do modelo, a única diferença entre as três formas, é que no WebLASH foi implementada apenas a possibilidade de modelagem concentrada para a bacia, enquanto nos complementos E-LASH e F-LASH foram implementadas, além disso, a possibilidade de modelagem por sub-bacias (semi-distribuído) (Figura 4).

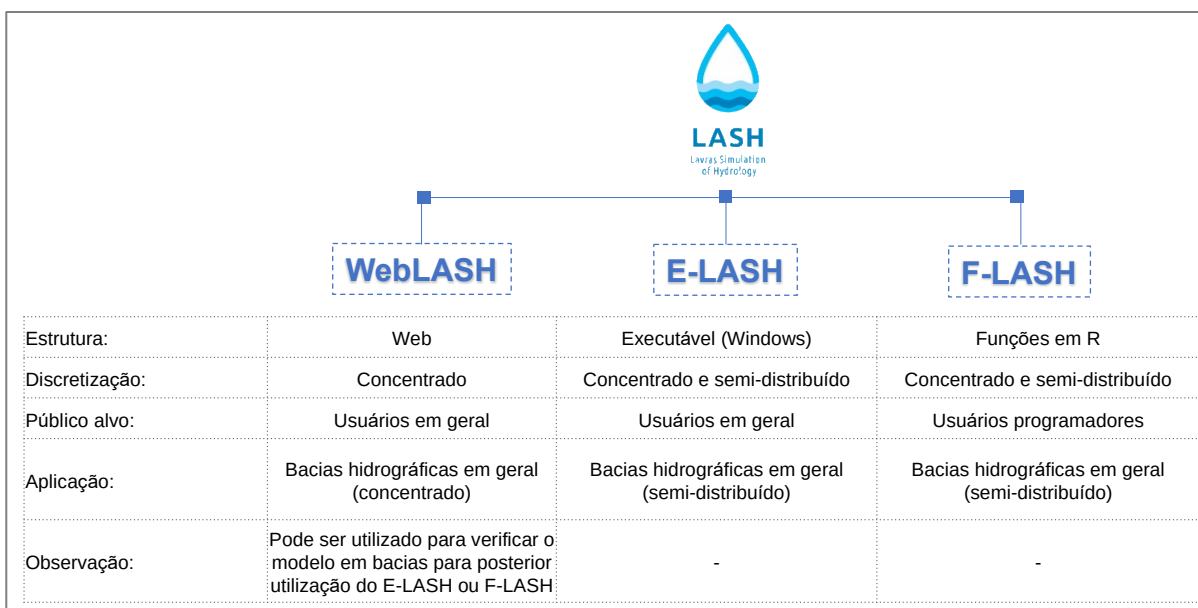


Figura 4 – Esquema do WebLASH e seus complementos, o E-LASH e o F-LASH.

Como a base metodológica foi a mesma para os três formatos, com exceção da escolha da modelagem concentrada *versus* semi-distribuída, foi preconizado neste estudo, em termos de metodologia, resultados e estudo de caso, apenas o WebLASH, haja vista que é o objeto principal considerando o público alvo. Outrossim, são apresentados, brevemente, os *highlights* de construção e programação do E-LASH e do F-LASH no final deste capítulo.

## 4.2 Simplificações e melhorias

Para otimizar o processamento do modelo hidrológico WebLASH foram realizados alguns estudos acerca da viabilidade de simplificação do modelo, sendo estas simplificações separadas por:

- **Processos hidrológicos suprimidos**

O processo hidrológico da capilaridade foi removido do novo versionamento do LASH, porque, em geral, corresponde a percentuais reduzidos do balanço hídrico em bacias hidrográficas. Com isso, o parâmetro de calibração  $K_{CAP}$  foi suprimido, o qual foi detectado como um parâmetro pouco sensível em estudos anteriores do modelo.

Outro processo suprimido foi o módulo de propagação de vazões, haja vista que a distribuição espacial utilizada do modelo foi a concentrada. Nesse sentido, levando em conta que esse módulo carrega a calibração do coeficiente de rugosidade de Manning, esse parâmetro também foi suprimido. Logo, o modelo passa a contar com apenas 6 parâmetros a serem calibrados.

- **Evapotranspiração**

Em relação à metodologia da evapotranspiração, a equação de Hargreaves-Samani (HARGREAVES; SAMANI, 1982) (Equação 43) foi adicionada, em conjunto com a equação de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998) (Equação 44) otimizada pelo pacote `BrazilMet`, de modo a proporcionar uma opção de diminuir a dependência de informações acerca de variáveis vegetativas do uso do solo (albedo, resistência estomática e altura de vegetação), as quais geralmente são de difícil obtenção.

De acordo com Oudin *et al.* (2005), a equação de Hargreaves-Samani necessita apenas dos dados de temperatura e dia juliano como séries históricas de entrada e valores de latitude e altitude média para o cálculo da radiação extraterrestre. No caso da latitude e altitude média, considera-se a latitude do centroide e a altitude média da bacia hidrográfica de interesse, conforme equações descritas a seguir (OUDIN *et al.*, 2005).

$$ET_0 = 0,0023 \cdot R_o \cdot (t_{\max} - t_{\min})^{0,5} \cdot (t + 17,8) \quad (\text{Eq. 43})$$

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \left( \frac{900}{T + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (\text{Eq. 44})$$

em que  $ET_0$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ),  $R_o$  é a radiação extraterrestre ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ),  $t_{\max}$  é a temperatura máxima ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_{\min}$  é a temperatura

mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\lambda$  é o calor latente de vaporização ( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),  $t$  é a temperatura média ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\Delta$  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 ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ),  $e_a$  a pressão atual do vapor d'água ( $\text{kPa}$ ),  $e_s$  a pressão de saturação do vapor d'água ( $\text{kPa}$ ),  $G$  é o fluxo de energia para o solo ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ), considerado nulo,  $\gamma$  a constante psicrométrica ( $\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),  $T$  é a temperatura média diária do ar a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $u_2$  velocidade do vento a 2 m de altura ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

As equações referentes aos cálculos de alguns parâmetros da Equação 44 estão presentes em Allen *et al.* (1998). Em relação à equação de Hargreaves-Samani, Cunha, Magalhães e Castro (2013) constataram que a referida equação obteve um bom desempenho quando comparada a outras equações.

Para transformar os dados de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) em evapotranspiração de cultura ( $ET_c$ ) foi considerado o coeficiente de cultura ( $K_c$ ) (Equação 45). Nesse sentido, a demanda por informações de uso do solo é consideravelmente diminuída, pois utiliza o  $K_c$  ao invés de resistência estomática, albedo e altura de vegetação. Vale destacar que nas versões anteriores do LASH, a  $ET_c$  era calculada diretamente pela equação de Penman-Monteith, o que justificava o uso dos parâmetros vegetativos do solo (albedo, resistência estomática e altura de vegetação), os quais foram suprimidos nessa simplificação do módulo de Evapotranspiração.

Em suma, a  $ET_0$  é a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética, com uma altura uniforme de 12 cm, resistência do dossel da cultura de 70 s/m e albedo de 0,23; enquanto a  $ET_c$  é a soma da evaporação da água no solo e a transpiração das plantas, sendo que, em seu potencial máximo, a cultura deve estar livre de fatores limitantes (ALBUQUERQUE; COELHO, 2021).

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (\text{Eq. 45})$$

O coeficiente  $K_c$ , segundo Albuquerque e Coelho (2021), varia com o estágio de crescimento de cada cultura e representa o efeito integrado de mudança na área foliar da cultura, da altura das plantas, do grau de cobertura, da resistência do dossel da cultura e do albedo. Após conduzir a multiplicação pelo  $K_c$ , é realizada a multiplicação pelo coeficiente de estresse hídrico (Equação 4) para transformação da  $ET_c$  em  $ET_R$ .

Foram considerados artifícios de programação em R, como os pacotes *BrazilMet* (FILGUEIRAS *et al.*, 2021) e *Evapotranspiration* (GUO *et al.*, 2022) para aprimorar o módulo de evapotranspiração do modelo.

- **Preenchimento de falhas**

Quanto ao preenchimento de falhas, a ideia foi utilizar um estimador que permitisse preencher os dados faltantes por estimativas a partir das estatísticas da própria série de chuva. Para tal, foi empregado o Filtro de Kalman, que é um método avançado e bastante implementado para incorporar novas informações de uma série temporal e integrá-las de maneira inteligente com informações previamente conhecidas para estimar um estado subjacente (NIELSE, 2021). Essa metodologia, de acordo com Nielsen (2021), foi utilizada na missão do Apollo 11 (1969), quando os engenheiros responsáveis perceberam que os recursos computacionais a bordo não permitiam outras técnicas de estimativa de posicionamento com alto uso de memória.

Krauskopf Neto (2005) explica que o Filtro de Kalman estima o estado real de um sistema a partir de uma estimativa inicial do estado, obtida da aplicação do modelo do sistema, e de medições, no protótipo, de fenômenos que estejam relacionados com o estado real do sistema. Assim, a obtenção da estimativa do estado real de um sistema pelo Filtro de Kalman pressupõe duas etapas: i) propagação: dado o estado do sistema no instante  $t_0$ , aplica-se o modelo do sistema para obtenção da estimativa inicial (*a priori*) do estado no instante  $t_1$ , adiante no tempo; ii) atualização: obtidas as medições no protótipo, para o instante  $t_1$ , das grandezas associadas ao estado real do sistema, as mesmas são utilizadas para corrigir a estimativa *a priori* do estado no instante  $t_1$ , gerando a estimativa atualizada (estimativa *a posteriori*).

Segundo Fung (2006), para produzir estimadores futuros, o problema é chamado de previsão ou predição, para atualizar os estimadores atuais, o processo é chamado de filtragem e para estimadores anteriores, o processo é chamado de suavização. Nesse sentido, para o problema de preenchimento de falhas, o processo é chamado de suavização. Basicamente, a metodologia de Kalman (1960) considera os dados anteriores e posteriores à falha a ser preenchida.

Considerando a aplicação do Filtro de Kalman na hidrologia, Teodoro (2019) identificou, em seu estudo de comparação de método univariados para preenchimento

de falhas, que o Filtro de Kalman resultou em valores baixos de RMSE para o preenchimento de dados faltantes em séries de chuva diárias.

Nielsen (2021) apresenta o equacionamento do Filtro de Kalman, começando pelo modelo linear gaussiano considerando que um estado e observações possuem as seguintes dinâmicas:

$$x_t = F \cdot x_{t-1} + B \cdot u_t + w_t \quad (\text{Eq. 46})$$

$$x_t = A \cdot x_t + v_t \quad (\text{Eq. 47})$$

Onde o estado no tempo  $t$  é uma função do estado no intervalo de tempo anterior ( $F \cdot x_{t-1}$ ), um termo de força externa ( $B \cdot u_t$ ), e um termo estocástico ( $w_t$ ). Da mesma forma no tempo  $t$  é uma função do estado no tempo  $t$  e um termo de erro estocástico, erro de medição.

Considerando que  $x_t$  é o valor real,  $y_t$  é o valor mensurado e  $v_t$  é o erro de medição do valor mensurado, a Equação 48 é aplicável ao Filtro de Kalman para atualizar a estimativa no novo tempo  $t$ , onde  $K_t$  estabelece um equilíbrio entre as informações novas ( $\hat{x}_t$ ) e as antigas ( $y_t$ ).

$$\hat{x}_t = K_t \cdot y_t + (1 - K) + \hat{x}_{t-1} \quad (\text{Eq. 48})$$

Continuando a análise,  $P_t$  representa a estimativa da covariância do estado da variável de interesse,  $P_t^-$  é a estimativa para  $t$  antes da medição no tempo  $t$  ser levada em consideração,  $R$  representa a variância do erro de medição (a variância de  $v_t$ ). Sabendo disso, pode-se começar o processo de conhecer ou estimar os valores de  $x$  e  $P$  no tempo 0. Após isso, avança-se nos tempos após o tempo 0, adotando um processo iterativo com uma fase de predição e atualização, com a fase de predição (Equação 49 e 50) vindo primeiro, segunda pela fase de atualização/filtragem (Equações 51 e 52).

$$\hat{x}_t^- = F \cdot \hat{x}_{t-1} + B \cdot u_t \quad (\text{Eq. 49})$$

$$P_t^- = F \cdot P_{t-1} + F^t + Q \quad (\text{Eq. 50})$$

$$\hat{x}_t = \hat{x}_t^- + K_t \cdot (y_t - A \cdot \hat{x}_t^-) \quad (\text{Eq. 51})$$

$$P_t = (I - K_t \cdot A) \cdot P_t^- \quad (\text{Eq. 52})$$

Em que  $K_t$ , o ganho de Kalman é:

$$K_t = P_t^- \cdot A^T \cdot (A \cdot P_t^- \cdot A^T + R) \quad (\text{Eq. 53})$$

O preenchimento de falhas nesta versão simplificada do LASH foi implementado para trabalhar automaticamente nas séries históricas de chuva e de variáveis meteorológicas (a depender da equação de evapotranspiração escolhida pelo usuário). É importante destacar que este preenchimento de falhas é um apoio da ferramenta para lidar com dados faltantes. A limitação da metodologia deve ser considerada pelo usuário, principalmente quando os dados apresentarem muitos dias de falhas. Para implementar a metodologia de preenchimento de falhas, foi utilizado o pacote `imputeTS` (MORITZ *et al.*, 2022) por meio da função `imputeTS::na_kalman`.

Com o intuito de testar a metodologia do filtro de Kalman e validar sua implementação junto ao modelo, duas séries históricas de temperaturas mínimas e máximas obtidas junto ao INMet foram utilizadas. Para tal, foram removidos alguns períodos das séries históricas, com no máximo 5 dias de falhas consecutivos.

- **Calibração**

Para o WebLASH, foi implementada a discretização dos parâmetros de forma concentrada para a bacia hidrográfica, visando otimizar o tempo de processamento e facilitar a modelagem hidrológica para os usuários que buscam uma ferramenta que ofereça praticidade e rapidez. Além disso, para ampliar a utilização do LASH, foi adicionada a possibilidade de extrair os dados do modelo de forma mensal. Existem aplicações específicas que os usuários buscam hidrogramas mensais, *e.g.* demanda por hidrogramas mensais para estudo hidrológico para o dimensionamento de reservatórios.

Em relação ao algoritmo de calibração, foi considerada outra abordagem em comparação às versões anteriores do LASH, *i.e.* *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992). O objetivo de testar outro algoritmo, foi para buscar um processamento mais rápido, sem a perda de eficiência na otimização dos parâmetros, além de ser um algoritmo amplamente utilizado para calibração de modelos hidrológicos (ZHANG *et al.*, 2008; RAFIEI *et al.*, 2018; FERDOWSI *et al.*, 2022).



Neste sentido, foi implementado o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) (KENNEDY; EBERHART, 1995), e diferente do SCE-UA, o PSO não é um algoritmo genético, mas sim um meta-heurístico baseado na otimização de enxame de partículas. Segundo o estudo de Teixeira e Siqueira (2015), a otimização de enxame de partículas foi criada após estudos da convivência social dos pássaros, onde eles trocam informações na busca de alimento, e cada membro de um bando de pássaros determina sua velocidade com base em sua experiência pessoal, bem como informações obtidas por meio da interação com outros membros do bando. Cada pássaro, denominado partícula, voa, inicialmente, pelo espaço de busca e a partir da cooperação social, desloca-se na direção do alimento. Ainda segundo os autores, matematicamente, cada partícula é considerada uma possível solução para um problema de otimização.

De acordo com Vrugt e Robinson (2007), o PSO trabalha com um grupo de soluções em potencial (partículas) e procura soluções ideais, modificando continuamente essa população nas gerações subsequentes. Para começar, as partículas são atribuídas a uma localização e velocidade aleatórias no espaço de pesquisa  $n$ -dimensional. Após a inicialização, uma partícula ajusta iterativamente sua posição de acordo com a sua experiência de voo e de todas as outras partículas, fazendo uso da melhor posição encontrada por ela mesma, e por toda a população.

Em suma, o passo-a-passo básico teórico de otimização do PSO é (TEIXEIRA; SIQUEIRA, 2015):

- Passo 1: inicialização de uma população de partículas com posições aleatórias e velocidades, onde cada partícula contém  $n$  variáveis;
- Passo 2: avaliação da função objetivo para todas as partículas;
- Passo 3: atualização da velocidade e posição de cada partícula;
- Passo 4: avaliação dos valores objetivo de todas as partículas;
- Passo 5: para cada partícula, comparar o seu valor objetivo atual com o valor objetivo da sua melhor posição;
- Passo 6: determinação da melhor partícula do enxame atual com o melhor valor objetivo;
- Passo 7: verificação do critério de parada (número de iterações), se for atendido finaliza o algoritmo, caso contrário, retorna ao passo 3.

A Figura 5 ilustra o pseudocódigo do algoritmo PSO.

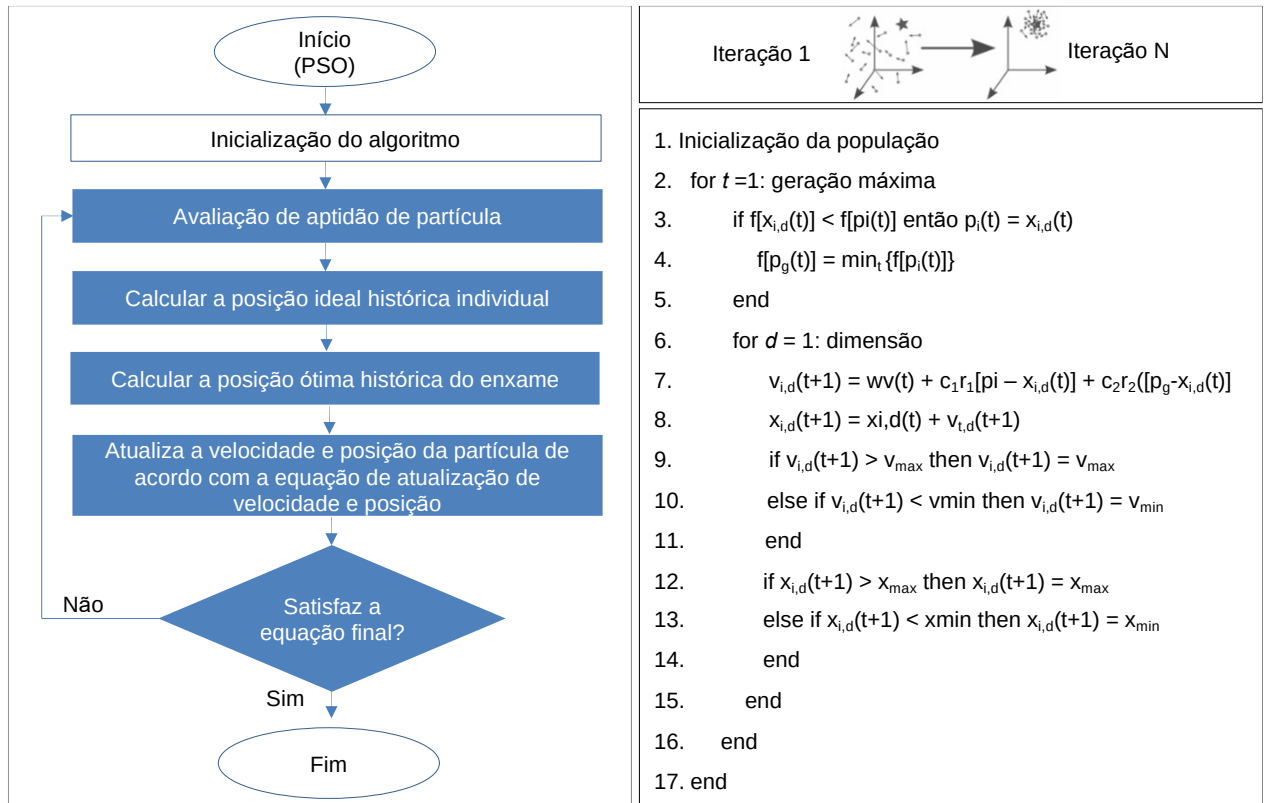


Figura 5 – Fluxograma e pseudocódigo do algoritmo PSO.

Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2018) e Dai *et al.* (2018).

A implementação do algoritmo PSO para otimização dos parâmetros do WebLASH se deu por meio do pacote `ps_o` (BENDTSEN, 2022).

Para a calibração do WebLASH foi utilizado o NSE (Equação 39), ao passo que o  $NSE_{LOG}$  (Equação 40), o RMSE (Equação 41) e o  $P_{BIAS}$  (Equação 42) foram utilizados como estatísticas para avaliar o desempenho do modelo em conjunto o NSE.

### 4.3 Descritivo dos pacotes utilizados

Para o WebLASH foram utilizados os seguintes pacotes de análise e tratamento de dados hidrológicos:

- **BrazilMet** (FILGUEIRAS *et al.*, 2021): utilizado para otimizar o módulo de evapotranspiração para *download* de estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMet) e o cálculo direto da evapotranspiração de Penman-Monteith;
- **Evapotranspiration** (GUO *et al.*, 2022): utilizado para o cálculo da evapotranspiração considerando a equação de Hargreaves-Samani;

- `hydrobr`: pacote do projeto `hydroversebr`, idealizado por hidrólogos voluntários (<https://github.com/hydroversebr/hydrobr>), e foi utilizado para otimizar o módulo de importação de dados de chuva e vazão da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) para *download* direto da plataforma;
- `hydroGOF` (BIGIARINI, 2020): utilizado para o cálculo de métricas estatísticas dos dados de vazões observada e estimada;
- `hydroTSM` (BIGIARINI, 2020): utilizado para gerar, de forma rápida e automática, as curvas de permanências das vazões observada e estimada;

Outrossim, as seguintes bibliotecas gerais foram utilizadas como suporte para a manipulação, tratamento e análise estatística de dados:

- `imputeTS` (MORITZ *et al.*, 2022): utilizado para computar o preenchimento de falhas em séries históricas por meio da do modelo de suavização de Kalman (1960) de espaço de estado;
- `lubridate` (SPINU *et al.*, 2021): utilizado como suporte para tratamento de data e agrupamento de dados;
- `padr` (THOEN, 2021): utilizado para realizar o preenchimento da data em séries históricas com presença de *missing days*; e
- `pso` (BENDTSEN, 2022): utilizado sob a função `pso::psoptim()` para a otimização dos parâmetros de calibração por meio do algoritmo PSO.

Para a concepção da plataforma web, as bibliotecas a seguir foram utilizadas em conjunto com as supracitadas anteriormente e permitem a manipulação geral de informações, construção do *layout web* e visualização das informações tabulares e gráficas: `dashboardthemes` (LILOVSKI, 2022), `DT` (XIE, 2022), `leafgl` (APPELHANS, 2020), `leaflet` (CHENG, 2022), `openxlsx` (SCHAUBERGER, 2021), `plotly` (SIEVERT, 2021), `prompter` (BACHER, 2021), `sf` (PEBESMA, 2022), `shiny` (CHANG *et al.*, 2022), `shiny.pwa` (SILVA, 2021), `shinyalert` (ATTALI *et al.*, 2021), `shinyBS` (BAILEY, 2022), `shinydashboard` (CHANG, 2021), `shinyjs` (ATTALI, 2021), `shinycssloaders` (SALI, 2020), `shinymanager` (THIEURMEL; PERRIER, 2021), `shinythemes` (CHANG *et al.*, 2021),

`shinyWidgets` (PERRIER *et al.*, 2022), `stringr` (WICKHAM, 2022) e `tidyverse` (WICKHAM, 2022).

#### 4.4 Módulos do WebLASH

O WebLASH foi subdivido em cinco módulos, os quais foram pensados para serem condicionados de acordo com certas escolhas do usuário (**Error! Reference source not found.**), sendo estes:

- i) *Processamento*: sendo possível escolher entre calibração, validação e simulação;
- ii) *Séries históricas*: onde é realizado o *input* das séries de vazão, chuva, dados meteorológicos e escolha da equação de evapotranspiração;
- iii) *Bacia hidrográfica*: condicionado às escolhas anteriores de fonte dos dados meteorológicos e da equação da evapotranspiração, e permite o *input* de dados como o  $K_c$  (constante ou sazonal), tempo de concentração, latitude, altitude média;
- iv) *Solo*: *input* dos dados de umidade do solo saturado, umidade no ponto de murcha permanente e profundidade do solo; e
- v) *Uso do solo*: *input* da profundidade do sistema radicular (constante ou sazonal).

Todos os módulos supracitados são referentes aos dados de entrada, e após computar o WebLASH, independente das opções escolhidas, a ferramenta foi programada para retornar os seguintes resultados: i) os parâmetros calibrados (quando a opção de processamento for *Calibração*); ii) as estatísticas de desempenho para os processamentos de *Calibração* e *Validação*; iii) o hidrograma; iv) a curva de permanência; e v) os componentes do balanço hídrico de forma mensal. Tanto o hidrograma quanto a curva de permanência apresentam resultados da vazão observada quando a escolha do *Processamento* for calibração ou validação. De modo que quando for simulação, os gráficos apresentam apenas a vazão simulada.

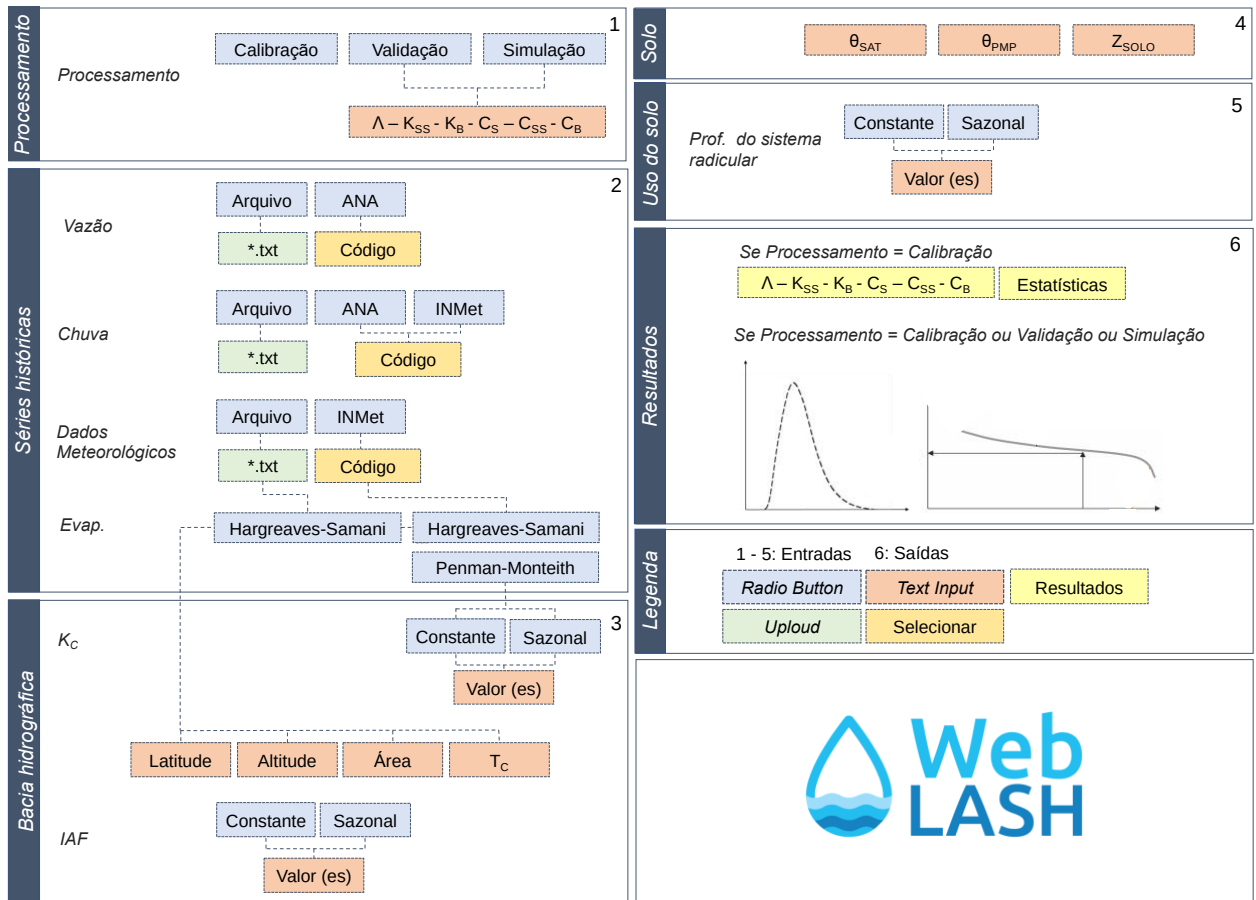


Figura 6 - Resumo dos módulos do WebLASH condicionados às escolhas dos usuários.

#### 4.5 Implementação do E-LASH e do F-LASH

O principal gargalo de idealização do E-LASH e F-LASH foi a limitação web de realizar grandes processamentos, como é o caso de uma modelagem semi-distribuída, haja vista que parte do processamento do ciclo hidrológico é computado dentro de dois *loops* principais, os quais remetem ao número de sub-bacias e ao passo de tempo das variáveis de entrada (diário).

O E-LASH foi implementado a partir do código-fonte do WebLASH com a discretização por sub-bacias hidrográficas, a fim de tornar o modelo semi-distribuído. Para tal, foi utilizado o *Electron* (ELECTRON, 2023), que é *framework* de código aberto que permite criar aplicativos *desktop* para Windows, Mac e Linux utilizando tecnologias web, e.g. HTML, CSS e JavaScript. O *Electron* basicamente realiza um encapsulamento do aplicativo de interesse para que possa ser executado em outra máquina sem a necessidade de conter os *softwares* que foram utilizados para

programá-lo, como neste caso o R e o RStudio. Neste primeiro momento, o E-LASH foi implementado apenas para sistemas operacionais Windows.

A ideia principal, a partir do E-LASH, é que o usuário possa usufruir de toda a interface do WebLASH com a opção da modelagem semi-distribuída por sub-bacias. Ou seja, o fluxo dos módulos do E-LASH é o mesmo apresentado na **Error! Reference source not found.** com a condição de que o processamento pode ser realizado para cada sub-bacia hidrográfica.

Para confeccionar as funções do F-LASH, o código de implementação do E-LASH foi utilizado como base, sendo um conjunto de funções que podem ser utilizadas pelo usuário a partir de um código *main-template*. Nesse sentido, o usuário realiza o *download* de todas as funções e as utiliza abertamente, tendo acesso a toda programação do F-LASH. A escolha desse formato em detrimento de efetivamente confeccionar um pacote em R, é para que o usuário tenha mais liberdade na utilização do código, além de facilitar a atualização e troca de ideias/parcerias com outros potenciais desenvolvedores. É importante destacar que para a utilização do F-LASH, tanto o R quanto a IDE RStudio devem estar instalados na máquina do usuário, além da necessidade de experiência, minimamente intermediária, com programação em R.

#### 4.6 Teste com o WebLASH

Com o intuito de testar o modelo WebLASH, demonstrar todo o passo-a-passo e opções de entrada, assim como fomentar a discussão sobre a ferramenta e seus resultados, foi utilizada a bacia hidrográfica do rio Piratini (BHRP). A BHRP foi utilizada em outras versões do LASH, sendo foi possível verificar se o modelo otimizado e simplificado em uma plataforma web se equipara às versões anteriores em termos de resultados alcançados.

Segundo Caldeira (2019), a BHRP possui uma área de drenagem de 4.700 km<sup>2</sup>, declividade média de 10,2%, predominância de solo Argissolo Amarelo (31,55%), Argissolo Bruno-Acizentado (21,61%) e Argissolo Vermelho-Amarelo (13,19%), com uso solo de Campo Nativo (51,30%), Pastagem (21,39%), Floresta Nativa (12,74%), Cultura Anual (5,27%), Solo Exposto (4,83%) e Floresta Plantada (4,47%). A BHRP conta com o rio Piratini como principal afluente, sendo um dos contribuintes do Canal São Gonçalo. Conforme ilustrado na Figura 7, pode-se observar a localização e a área

de influência até o ponto do exutório de código 88641000 no rio Piratini, onde se encontra a estação fluviométrica da ANA, utilizada neste estudo.

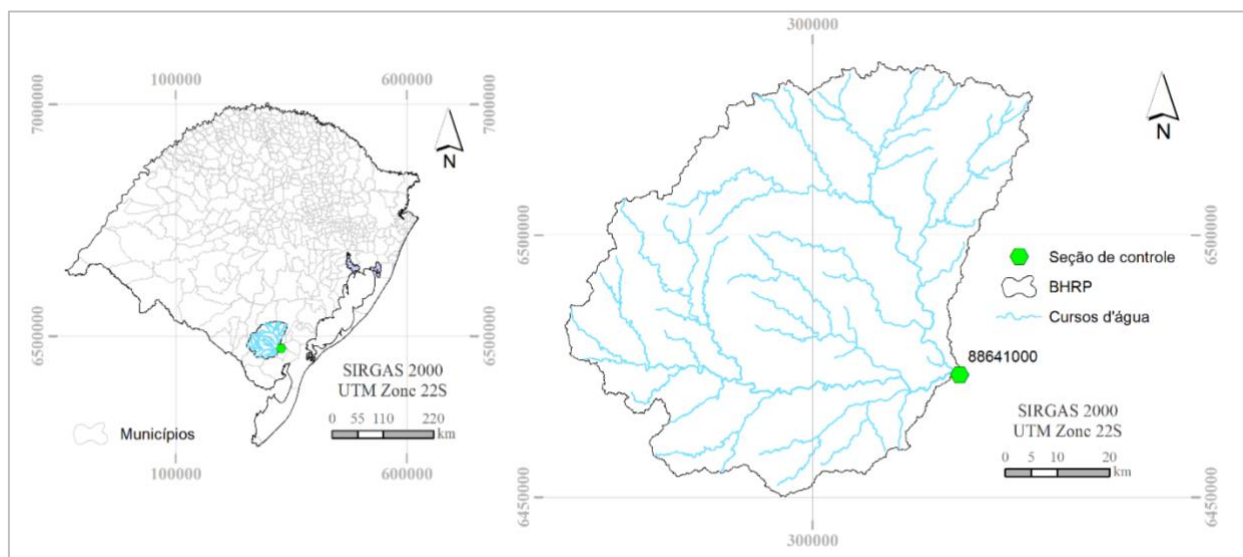


Figura 7 – Localização e hidrografia da BHRP considerando à área de drenagem à montante da estação fluviométrica considerada no estudo.

Para testar a calibração da BHRP no WebLASH, foi utilizada a mesma base de dados de Caldeira (2019), de modo que as estações pluviométricas e meteorológicas, bem como as informações utilizadas estão dispostas nos Quadro 3 e 4, respectivamente. Foram extraídas as médias das variáveis pluviométricas e meteorológicas para considerar a calibração de forma concentrada no WebLASH.

Quadro 3 – Caracterização das estações de monitoramento meteorológico e pluviométrico empregadas para a modelagem da BHRP no WebLASH.

| Nome                                 | Operadora/Responsável     | Código  | Variável | Latitude   | Longitude  | Altitude (m) |
|--------------------------------------|---------------------------|---------|----------|------------|------------|--------------|
| Sede                                 | CPACT/EMBRAPA             | 01      | M/P      | -31°42'00" | -52°24'00" | 20           |
| Cascata                              | CPACT/EMBRAPA             | 02      | M/P      | -31°28'12" | -52°30'36" | 169          |
| Estação Agrometeorológica de Pelotas | CPACT/EMBRAPA UFPeI INMET | 83895   | M/P      | -31°46'48" | -52°24'36" | 14           |
| Ponte Cordeiro de Farias             | CPRM/ANA                  | 3452016 | P        | -31°34'12" | -52°27'36" | 40           |
| Canguçu                              | CPRM/ANA                  | 3152003 | P        | -31°24'00" | -52°40'12" | 400          |
| Passo da Capela                      | CPRM/ANA                  | 3153006 | P        | -31°7'48"  | -53°3'00"  | 120          |
| Estação Experimental do Piratini     | CPRM/ANA                  | 3153021 | P        | -31°25'48" | -53°6'36"  | 340          |

| Nome             | Operadora/Responsável | Código  | Variável | Latitude   | Longitude  | Altitude (m) |
|------------------|-----------------------|---------|----------|------------|------------|--------------|
| Pinheiro Machado | CPRM/ANA              | 3153008 | P        | -31°34'48" | -53°28'48" | 440          |
| Pedras Altas     | CPRM/ANA              | 3153007 | P        | -31°43'48" | -53°35'24" | 380          |
| Ferraria         | CPRM/ANA              | 3153004 | P        | -31°44'24" | -53°3'00"  | 200          |
| Cerro Chato      | CPRM/ANA              | 3153022 | P        | -31°52'12" | -53°16'48" | 100          |
| Herval           | CPRM/ANA              | 3253004 | P        | -32°1'48"  | -53°24'00" | 260          |
| Pedro Osório     | CPRM/ANA              | 3152013 | P        | -31°52'48" | -52°48'36" | 27           |
| Vila Freire      | CPRM/ANA              | 3152005 | P        | -31°40'12" | -52°46'12" | 250          |
| Arroio Grande    | CPRM/ANA              | 3253001 | P        | -31°14'24" | -53°5'24"  | 3            |

M/P = Meteorológica/Pluviométrica; P = Pluviométrica.

Fonte: Caldeira (2019).

Quadro 4 – Informações e metodologias utilizadas para modelagem da BHRP no WebLASH.

|                                                          |                                      |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Período de aquecimento                                   | 2007                                 |
| Período de calibração                                    | 2008 - 2012                          |
| Equação de evapotranspiração                             | Penman-Monteith                      |
| Coefficiente de cultura ( $K_C$ ) - constante            | 0,60                                 |
| Área de drenagem                                         | 4.700 km <sup>2</sup>                |
| Altitude média                                           | 208 m                                |
| Latitude média                                           | -31,7°                               |
| Tempo de concentração                                    | 2.057 min                            |
| Índice de Área Foliar (IAF)                              | 2,02 m <sup>2</sup> ·m <sup>-2</sup> |
| Umidade do solo saturado ( $\theta_{SAT}$ )              | 0,43 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>  |
| Umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) | 0,17 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>  |
| Profundidade do solo ( $Z_{SOLO}$ )                      | 1.059 mm                             |
| Profundidade do sistema radicular ( $Z_{RAD}$ )          | 723 mm                               |

Os dados de vazão foram importados ao WebLASH em formato \*.txt, enquanto os dados de chuva média foram previamente calculados para a bacia, e também foram importados em formato \*.txt. Em relação aos dados meteorológicos, a estação automática A811 foi importada via opção do INMet, possibilitando, desta forma, o cálculo da evapotranspiração via equação de Penman-Monteith.

É importante destacar que os dados de  $K_C$ ,  $\theta_{SAT}$ ,  $\theta_{PMP}$ ,  $Z_{SOLO}$  e  $Z_{RAD}$  do Quadro 4 foram considerados como valores médios para a BHRP, pois o WebLASH computa a modelagem de forma concentrada. Isso significa que é necessário que o usuário processe as informações anteriormente à modelagem. Esse processamento pode ser realizado em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), por exemplo.



## 5 Resultados e discussão

### 5.1 Menu Início

A Figura 8 ilustra o primeiro contato do usuário com o WebLASH, onde constam algumas informações iniciais sobre o modelo, como a última atualização no servidor. O pacote `shiny` permite que a aplicação web fique responsiva, ou seja, independe do navegador e do aparelho em que está sendo acessada, proporcionando uma boa experiência visual de interface.

## WebLASH

O WebLASH é a versão web do modelo hidrológico *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH), sendo idealizado de forma concentrada, após simplificar alguns de seus processos e metodologias sem perder o estado-da-arte do modelo original. Além desta plataforma web, o usuário possui outros dois complementos de interação com as premissas iniciais implementadas no WebLASH, sendo: i) o E-LASH: um executável do WebLASH, para usuários pouco familiarizados com programação, dispondo da opção de modelagem concentrada e semi-distribuída por sub-bacias; e o ii) F-LASH: um conjunto de funções para usuários da linguagem de programação R, também dispondo da opção de modelagem concentrada e semi-distribuída por sub-bacias.

Em suma, caso o usuário necessite de um modelo com maior discretização espacial, é possível utilizar o WebLASH de forma preliminar para verificar a aderência do modelo à bacia de estudo, pré-visualizar os resultados e, posteriormente, utilizar o E-LASH para computar a modelagem por sub-bacias. A idealização do E-LASH ocorreu da necessidade de apresentar o WebLASH com a opção de calibração por sub-bacias, algo que seria inviável, em termos de tempo de processamento, na forma web. Nesse sentido, o WebLASH e seus complementos (E-LASH e F-LASH) abrangem praticamente todos os potenciais usuários de modelos hidrológicos na área de consultoria, além de usuários programadores que possuam formação em hidrologia. Vale destacar que, em termos de metodologia do modelo, a única diferença entre as três formas, é que no WebLASH foi implementada apenas a possibilidade de modelagem concentrada para a bacia, enquanto no E-LASH e no F-LASH foram implementadas, além disso, a possibilidade de modelagem por sub-bacias (semi-distribuído) (Figura).

Última atualização do WebLASH no servidor: julho/2023.



GP Hidrologia



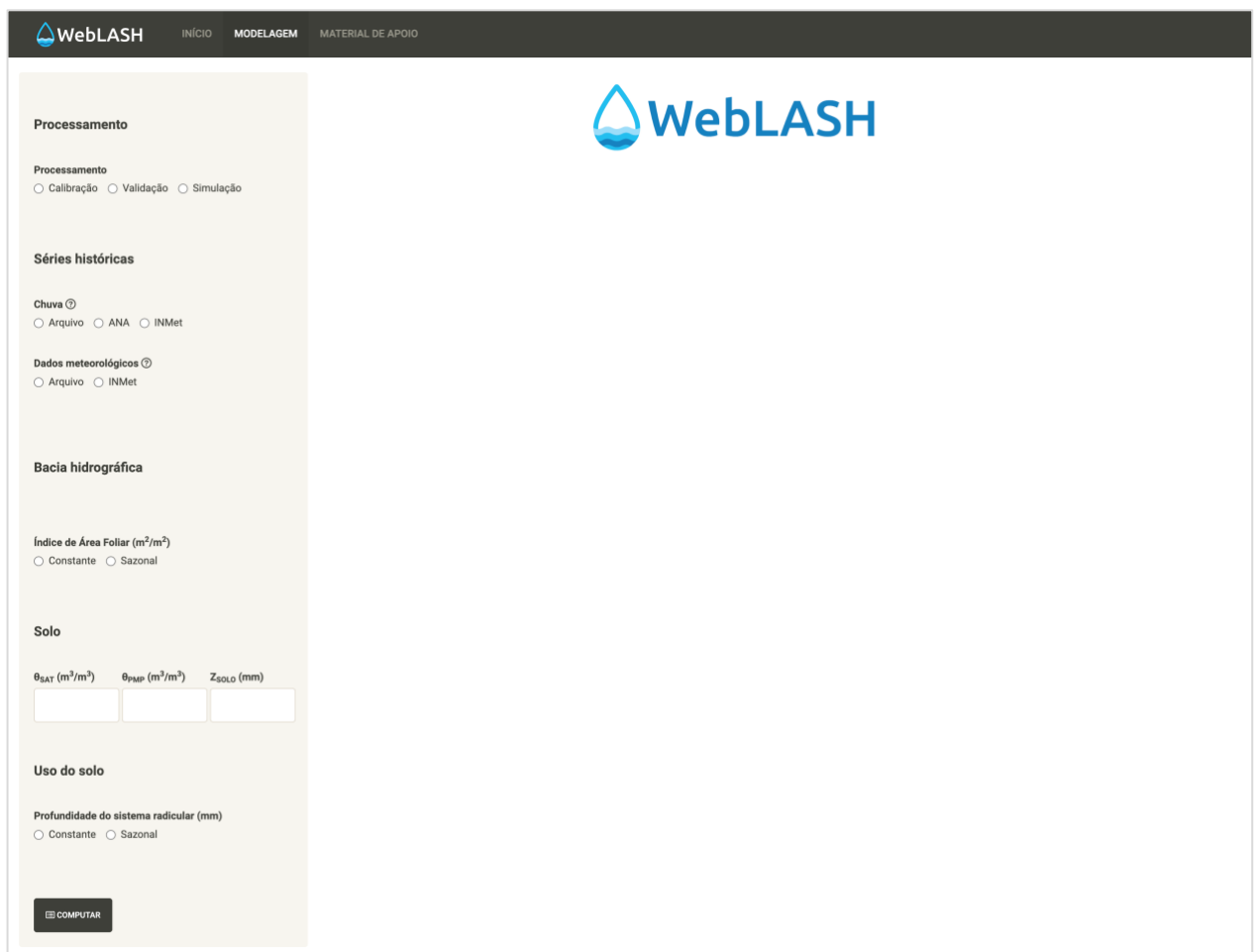
**HIDROLOGIA  
E MODELAGEM  
HIDROLÓGICA**  
EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Figura 8 – Interface de inicialização do WebLASH, sendo a tela de primeiro contato do usuário com o modelo.

## 5.2 Menu Modelagem

Na Figura 9, é possível verificar onde é realizada a modelagem do WebLASH, e quais campos o usuário deve preencher para executar o modelo. A alta complexidade, em termos hidrológicos e de programação do modelo, está justamente nesta tela, onde se encontra um leque de opções condicionadas de acordo com as escolhas do usuário. Um dos grandes gargalos de desenvolvimento do WebLASH foi justamente implementar um modelo hidrológico com uma interface gráfica bastante simplificada.

A Figura 9 também exemplifica uma grande vantagem em relação às versões anteriores do LASH, porque é a primeira vez que o modelo permite que o usuário, sem conhecimentos em programação, consiga inserir todas as informações hidrológicas e tenha total controle sobre os resultados do modelo. Com exceção da versão em planilhas eletrônicas, até a última versão (R-LASH), apenas usuários com conhecimentos em programação poderiam executar o LASH.



The screenshot displays the 'Modelagem' (Modeling) menu of the WebLASH web application. The interface is divided into a left sidebar and a main content area. The sidebar contains several sections with radio button options: 'Processamento' (Calibração, Validação, Simulação), 'Séries históricas' (Chuva with sub-options Arquivo, ANA, INMet; and Dados meteorológicos with sub-options Arquivo, INMet), 'Bacia hidrográfica' (Índice de Área Foliar with sub-options Constante, Sazonal), 'Solo' (with input fields for  $\theta_{SAT}$ ,  $\theta_{VMP}$ , and  $Z_{SOLO}$ ), and 'Uso do solo' (Profundidade do sistema radicular with sub-options Constante, Sazonal). A 'COMPUTAR' button is located at the bottom of the sidebar. The main content area features the WebLASH logo and a dark navigation bar at the top with links for 'WebLASH', 'INÍCIO', 'MODELAGEM', and 'MATERIAL DE APOIO'.

Figura 9 – Módulos presentes no menu *Modelagem* do WebLASH.

### 5.2.1 Processamento

Neste módulo, as primeiras informações que o usuário deve inserir são acerca da escolha do tipo de processamento: calibração, validação ou simulação. A escolha sendo validação ou simulação, condiciona os campos para inserção dos parâmetros previamente calibrados, partindo do pressuposto que o usuário calibrou o modelo previamente com mesmos parâmetros (Figura 10). Caso o usuário opte pelo processamento da calibração, este campo permanecerá oculto.

Em *Processamento*, há uma outra grande vantagem do WebLASH frente às versões anteriores, o controle do usuário sobre como as informações da bacia são utilizadas, para calibração, validação ou simulação.

Figura 10 – Campos para inserção dos parâmetros de calibração do WebLASH quando da escolha do processamento de validação ou simulação.

### 5.2.2 Séries históricas

Este módulo é acerca do *input* das séries históricas de vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), chuva (mm) e temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). Para a vazão, há a possibilidade de escolha de *upload* de arquivo com dados em formato \*.txt no padrão da Figura 11 ou a importação diretamente do site da ANA, no Hidroweb (Figura 12). Os códigos das séries de vazão da ANA são oriundos do inventário e foram obtidos por meio do pacote *hydrobr*. Com vistas a otimizar o tempo de busca dessas séries, o inventário (estações disponíveis para *download*) foi obtido fora do processamento do WebLASH, nesse sentido necessita ser atualizado periodicamente (pelo menos uma vez ao ano), para caso haja novas séries de vazão ou ainda atualizações nas mesmas. O pacote *hydrobr* é um dos exemplos da grande vantagem de se utilizar uma linguagem funcional como o R,

por conseguir aproveitar funções de pacotes desenvolvidos por terceiros, otimizando a programação e a extensão do código.



```
01_dados_vazao - Bloco de Notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
data; vazao
01/01/2007; NA
02/01/2007; NA
03/01/2007; NA
04/01/2007; NA
05/01/2007; NA
06/01/2007; NA
07/01/2007; NA
08/01/2007; NA
09/01/2007; NA
10/01/2007; NA
11/01/2007; NA
12/01/2007; NA
13/01/2007; NA
14/01/2007; NA
15/01/2007; NA
16/01/2007; NA
17/01/2007; NA
18/01/2007; NA
19/01/2007; NA
20/01/2007; NA
21/01/2007; NA
22/01/2007; NA
```

Figura 11 – Exemplo de estruturação dos dados de vazão em formato \*.txt.

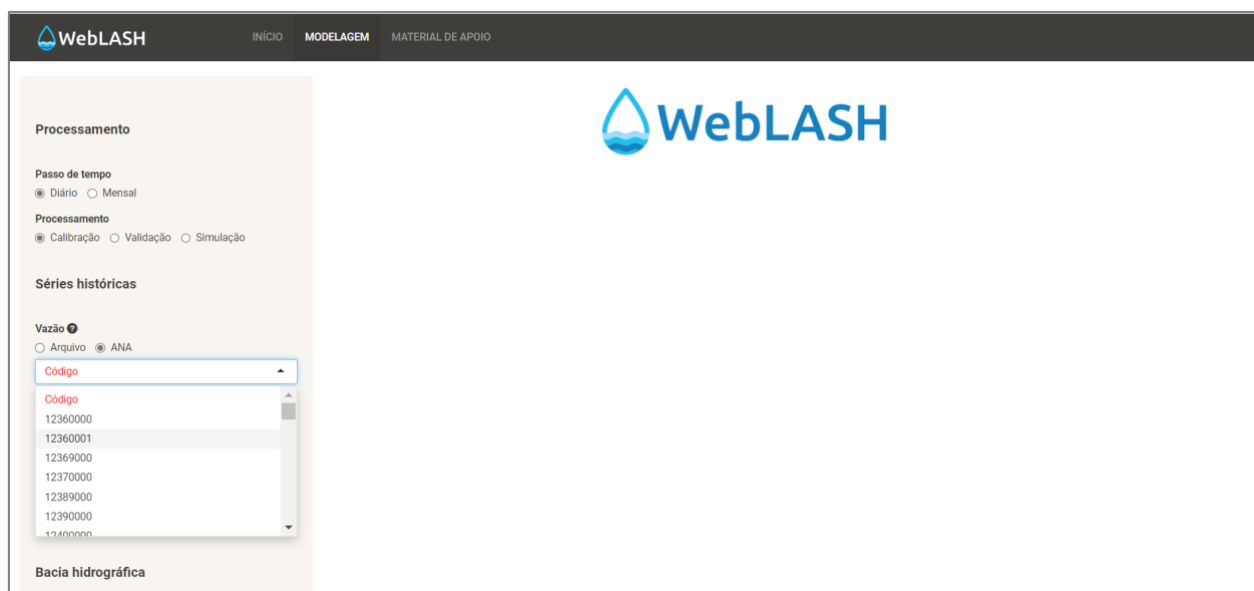


Figura 12 – Campo para escolha da série de vazões de acordo com os arquivos correspondentes às estações fluviométricas disponíveis no banco de dados do Hidroweb/ANA.

Para o *upload* de arquivos com dados de vazão, é necessário que o arquivo contenha exatamente o período que será utilizado. No exemplo da Figura 8, o primeiro ano da série (2007) possui resultados NA, pois foi o período considerado para o

aquecimento do modelo, o qual deverá ser avaliado pelo usuário para a série de dados de interesse. Caso o usuário opte por escolher uma série de vazão da ANA, após o carregamento dos dados, é possível escolher o período que será utilizado (Figura 13), sendo que o primeiro ano será considerado para aquecimento do modelo. No caso, só são habilitadas as datas com histórico de dados, facilitando a visualização do período disponível.



Figura 13 – Campo para escolha do período da série de vazões da ANA a ser considerado na calibração.

O campo da série histórica da chuva é semelhante ao da vazão, de modo que além da possibilidade de *upload* dos arquivos com dados em formato \*.txt (Figura 14) e da importação da base da ANA, também há a possibilidade de importar os dados diretamente do INMet (Figura 15). A facilidade de conseguir importar os arquivos diretamente do servidor do Hidroweb/ANA e do INMet é uma das grandes vantagens do WebLASH, principalmente considerando que o usuário precisaria buscar e realizar o *download* de cada arquivo nas plataformas do HidroWeb e do Banco de Dados Meteorológicos do INMet (BDMEP), as quais ainda possuem passos que limitam essa busca. É exatamente essa praticidade que o WebLASH busca trazer para os principais públicos de usuários para o qual foi idealizado.

02\_dados\_chuva\_diaria - Bloco de Notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

```
data;chuva
01/01/2007;0,00
02/01/2007;0,00
03/01/2007;0,00
04/01/2007;1,52
05/01/2007;21,36
06/01/2007;2,78
07/01/2007;0,00
08/01/2007;0,17
09/01/2007;0,00
10/01/2007;0,00
11/01/2007;2,72
12/01/2007;33,17
13/01/2007;0,00
14/01/2007;0,00
15/01/2007;0,00
16/01/2007;0,00
17/01/2007;0,10
18/01/2007;6,69
19/01/2007;0,00
20/01/2007;9,37
21/01/2007;0,84
22/01/2007;0,00
```

Figura 14 – Exemplo de estruturação dos dados de chuva em formato \*.txt.

The screenshot shows the WebLASH web interface. On the left, there is a sidebar with the following sections:

- Processamento**
  - Passo de tempo: ☒ Diário ☐ Mensal
  - Processamento: ☒ Calibração ☐ Validação ☐ Simulação
  - Séries históricas
    - Vazão: ☐ Arquivo ☒ ANA
      - Dropdown menu: 87905000
    - Período: 01/01/2010 - 31/12/2020
    - Chuva: ☐ Arquivo ☐ ANA ☒ INMet
      - Dropdown menu: A043

On the right, the main area displays the WebLASH logo.

Figura 15 – Exemplo de escolha de importação dos dados do INMet para a chuva.

Quando do *upload* dos arquivos de chuva com dados em formato \*.txt é estritamente necessário que não hajam falhas na série histórica, pois caso isso ocorra o funcionamento da ferramenta será afetado. Em termos hidrológicos, não é possível que as séries históricas de chuva e meteorológicas possuam falhas, porque o balanço de armazenamento de água no solo é realizado no passo de tempo diário, e caso hajam períodos sem dados, o cálculo do balanço fica comprometido. Nesse sentido, caso seja importado um arquivo com registros não-numéricos, a mensagem da Figura

16 é mostrada na tela, indicando inclusive, a(s) linha(s) com problema(s) para que o usuário se atente e possa corrigi-la(s).

The screenshot shows the WebLASH web interface. The top navigation bar includes 'WebLASH', 'INÍCIO', 'MODELAGEM', and 'MATERIAL DE APOIO'. The main content area is divided into several sections:

- Processamento:** Includes radio buttons for 'Calibração' (selected), 'Validação', and 'Simulação'.
- Séries históricas:**
  - Vazão:** Radio buttons for 'Arquivo' (selected) and 'ANA'. A file upload section shows '01\_dados\_vazao.txt' and an 'Upload complete' message.
  - Chuva:** Radio buttons for 'Arquivo' (selected), 'ANA', and 'INMet'. A file upload section shows '02\_dados\_chuva\_diaria2.txt' and an 'Upload complete' message.
  - Dados meteorológicos:** Radio buttons for 'Arquivo' and 'INMet'.
- Bacia hidrográfica:** Includes a section for 'Índice de Área Foliar ( $m^2/m^2$ )' with radio buttons for 'Constante' and 'Sazonal'.
- Solo:** Includes input fields for  $\theta_{SAT}$  ( $m^3/m^3$ ),  $\theta_{WAP}$  ( $m^3/m^3$ ), and  $Z_{SOL}$  (mm).
- Uso do solo:** Includes a section for 'Profundidade do sistema radicular (mm)' with radio buttons for 'Constante' and 'Sazonal'.

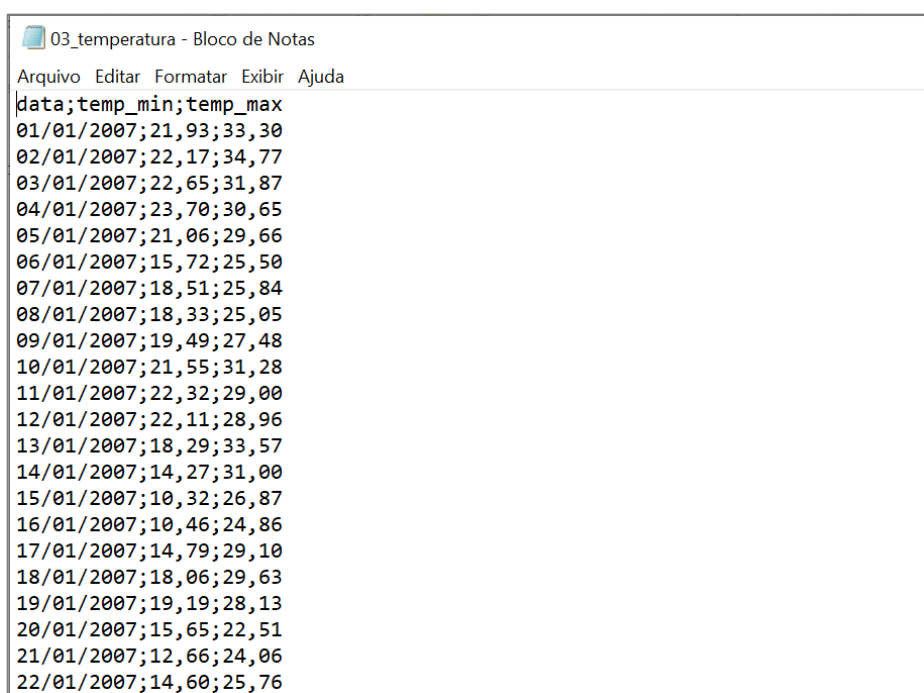
A red alert box at the bottom right states: 'Os dados de chuva possuem registros não numéricos na(s) linha(s): 15 27'.

Figura 16 – Exemplo de alerta quando da importação de dados de chuva que possuem registros não-numéricos.

É necessário que o arquivo a ser importado contenha exatamente o período do arquivo de vazão, caso este tenha sido importado à ferramenta via arquivo \*.txt. Se o usuário optar por dados de vazão da ANA, o período será automaticamente repassado para os dados de chuva, não sendo necessário escolher novamente o período da modelagem. É importante destacar que os dados importados da plataforma do INMet são oriundos apenas das estações automáticas, sendo que não há dados para o período anterior ao ano de 2001. Essa limitação se dá por causa do pacote utilizado para o *download* e tratamento dos dados meteorológicos. As estações convencionais não podem ser importadas, porque o pacote `BrazilMet` considera o *download* apenas das automáticas. A grande vantagem desse pacote, é a redução no código, no entanto, em estudos futuros há a possibilidade de implementar uma rotina para acessar o servidor do INMet e obter as estações convencionais.



O formato de escolha dos dados meteorológicos (*Arquivo* ou *INMet*) condiciona as escolhas para o cálculo da evapotranspiração. Se o usuário optar por realizar *upload* de arquivos com dados meteorológicos em formato \*.txt, estes deverão conter a data e os dados de temperatura mínima e máxima (Figura 17), e a evapotranspiração fica condicionada à equação de Hargreaves-Samani (Figura 18). Isso ocorre, pois, a equação necessita, em termos de séries históricas, apenas das temperaturas mínima e máxima para computar a evapotranspiração. No entanto, se o usuário optar pelos dados meteorológicos do INMet, a evapotranspiração poderá ser calculada pelas equações de Hargreaves-Samani ou Penman-Monteith (Figura 19). Neste caso, a equação de Penman-Monteith é acrescida, pois os dados obtidos junto ao INMet permitem o cálculo da evapotranspiração por meio desta equação, a qual possui um número considerável a mais de parâmetros.



```
03_temperatura - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
data;temp_min;temp_max
01/01/2007;21,93;33,30
02/01/2007;22,17;34,77
03/01/2007;22,65;31,87
04/01/2007;23,70;30,65
05/01/2007;21,06;29,66
06/01/2007;15,72;25,50
07/01/2007;18,51;25,84
08/01/2007;18,33;25,05
09/01/2007;19,49;27,48
10/01/2007;21,55;31,28
11/01/2007;22,32;29,00
12/01/2007;22,11;28,96
13/01/2007;18,29;33,57
14/01/2007;14,27;31,00
15/01/2007;10,32;26,87
16/01/2007;10,46;24,86
17/01/2007;14,79;29,10
18/01/2007;18,06;29,63
19/01/2007;19,19;28,13
20/01/2007;15,65;22,51
21/01/2007;12,66;24,06
22/01/2007;14,60;25,76
```

Figura 17 – Exemplo de estruturação dos dados de temperatura em formato \*.txt.

WebLASH INÍCIO MODELAGEM MATERIAL DE APOIO

**Processamento**

Processamento  
☒ Calibração ☐ Validação ☐ Simulação

**Séries históricas**

Vazão ⓘ  
☒ Arquivo ☐ ANA  
 BROWSE... 01\_dados\_vazao.txt  
 Upload complete

Chuva ⓘ  
☒ Arquivo ☐ ANA ☐ INMet  
 BROWSE... 02\_dados\_chuva\_diaria.txt  
 Upload complete

Dados meteorológicos ⓘ  
☒ Arquivo ☐ INMet  
 BROWSE... 03\_temperatura.txt  
 Upload complete

Evapotranspiração  
☒ Hargreaves-Samani

Figura 18 – Condicionamento da evapotranspiração quando da escolha de *upload* de arquivo para as séries históricas da temperatura.

WebLASH INÍCIO MODELAGEM MATERIAL DE APOIO

**Processamento**

Processamento  
☒ Calibração ☐ Validação ☐ Simulação

**Séries históricas**

Vazão ⓘ  
☒ Arquivo ☐ ANA  
 BROWSE... 01\_dados\_vazao.txt  
 Upload complete

Chuva ⓘ  
☒ Arquivo ☐ ANA ☐ INMet  
 BROWSE... 02\_dados\_chuva\_diaria.txt  
 Upload complete

Dados meteorológicos ⓘ  
☐ Arquivo ☒ INMet  
 Código

Evapotranspiração  
☐ Hargreaves-Samani ☐ Penman-Monteith-FAO

Figura 19 - Condicionamento da evapotranspiração quando da escolha de importação de arquivo com dados de temperatura do servidor do INMet.

Se a opção de obtenção dos dados via INMet for a escolhida, após a inserção do código da estação, é necessário aguardar para que o WebLASH consiga realizar o *download* do arquivo correspondente à estação de interesse. Para isso, uma barra de progresso no canto inferior direito pode ser visualizada enquanto carrega o *download*.

É importante destacar que neste módulo de *Séries históricas*, todas as séries importadas da ANA ou do INMet, *i.e.* chuva ou dados meteorológicos, possuem as falhas processadas automaticamente por meio do filtro de Kalman (1960). Logo, é uma premissa intrínseca à ferramenta que o usuário não possui controle de alteração.

No tocante ao teste do filtro de Kalman para validar a implementação no WebLASH considerando duas séries de temperaturas mínimas e máximas do INMet, este se mostrou adequado, todavia, os valores preenchidos circundam em torno do último valor registrado (Figura 20), indicando que cuidados na aplicação do método e uma exploração mais adequada são necessários.

| Data       | Temp. Mín. Real | Temp. Mín. Kalman | Data       | Temp. Máx. Real | Temp. Máx. Kalman |
|------------|-----------------|-------------------|------------|-----------------|-------------------|
| 11/08/2008 | 9,19            | 9,19              | 16/03/2007 | 25,58           | 25,58             |
| 12/08/2008 | 13,93           | 8,04              | 17/03/2007 | 24,18           | 27,23             |
| 13/08/2008 | 1,95            | 8,38              | 18/03/2007 | 23,2            | 27,41             |
| 14/08/2008 | 4,55            | 8,72              | 19/03/2007 | 24,47           | 27,58             |
| 15/08/2008 | 11,31           | 9,06              | 20/03/2007 | 25,26           | 27,76             |
| 16/08/2008 | 13,9            | 9,40              | 21/03/2007 | 25,73           | 27,94             |
| 17/08/2008 | 9,49            | 9,49              | 22/03/2007 | 27,56           | 27,56             |
| ...        |                 |                   | ...        |                 |                   |
| 12/09/2012 | 12,77           | 12,77             | 23/12/2012 | 33,01           | 33,01             |
| 13/09/2012 | 13,99           | 12,72             | 24/12/2012 | 36,37           | 30,02             |
| 14/09/2012 | 12,39           | 12,93             | 25/12/2012 | 38,53           | 29,92             |
| 15/09/2012 | 15              | 13,15             | 26/12/2012 | 30,85           | 29,82             |
| 16/09/2012 | 17,5            | 13,36             | 27/12/2012 | 20,84           | 29,71             |
| 17/09/2012 | 16,67           | 13,58             | 28/12/2012 | 23,57           | 29,61             |
| 18/09/2012 | 16,83           | 13,79             | 29/12/2012 | 27,47           | 27,47             |
| 19/09/2012 | 15,67           | 15,67             |            |                 |                   |

Figura 20 – Teste dos resultados do filtro de Kalman.

Para os dados importados via arquivo estruturado pelo usuário, estes não devem possuir falhas, sendo a cargo do usuário aplicar a metodologia de sua escolha para o preenchimento. Assim como os dados de chuva via \*.txt, o arquivo de temperatura, caso importado, também é testado no WebLASH para verificar registros não-numéricos, emitindo uma mensagem semelhante ao que consta na Figura 16.

O módulo de *Séries Históricas* e a forma como as séries de vazão, chuva, dados meteorológicos e evapotranspiração são condicionadas entre si exemplifica outra vantagem do WebLASH, principalmente pelo pré-processamento dessas séries quando da escolha de importação das plataformas da ANA e/ou INMet. Algo que até então, nas versões anteriores do LASH, não havia possibilidade, sendo possível apenas a importação de séries pré-processadas pelo usuário.

### 5.2.3 Bacia hidrográfica

As informações necessárias referentes à bacia hidrográfica de interesse para modelagem são condicionadas à escolha da metodologia para a evapotranspiração.

Sendo que, caso a equação de Penman-Monteith seja escolhida, as informações de coeficiente de cultura ( $K_c$ ), área de drenagem ( $\text{km}^2$ ) e tempo de concentração (min) da bacia hidrográfica são necessárias (Figura 21). Para o  $K_c$ , é possível escolher como entrada, apenas um valor constante médio para a bacia (*Constante*) ou quatro valores de acordo com as estações do ano do Brasil (*Sazonal*), um valor médio de  $K_c$  para cada estação do ano. No entanto, caso a equação de Hargreaves-Samani seja escolhida, os campos de latitude média ( $^\circ$ ) e altitude média (m) são acrescentados para preenchimento (Figura 22).

The screenshot displays the WebLASH web application interface. The top navigation bar includes the WebLASH logo and links for INÍCIO, MODELAGEM, and MATERIAL DE APOIO. The main content area is divided into a left sidebar and a right panel. The sidebar, titled 'Processamento', contains several sections: 'Séries históricas' with options for 'Vazão' (Arquivo, ANA) and 'Chuva' (Arquivo, ANA, INMet); 'Dados meteorológicos' with options for 'Arquivo' and 'INMet'; 'Evapotranspiração' with options for 'Hargreaves-Samani' and 'Penman-Monteith-FAO'; and 'Bacia hidrográfica' with options for 'Coeficiente de cultura ( $K_c$ )' (Constante, Sazonal) and input fields for 'Área de drenagem ( $\text{km}^2$ )' and 'Tempo de concentração (min)'. The right panel features the WebLASH logo and a large empty space for visualization or output.

Figura 21 – Condicionamento dos dados de entrada referentes à bacia hidrográfica de acordo com a escolha da equação de Penman-Monteith.

Figura 22 – Condicionamento dos dados de entrada referentes à bacia hidrográfica de acordo com a escolha da equação de Hargreaves-Samani.

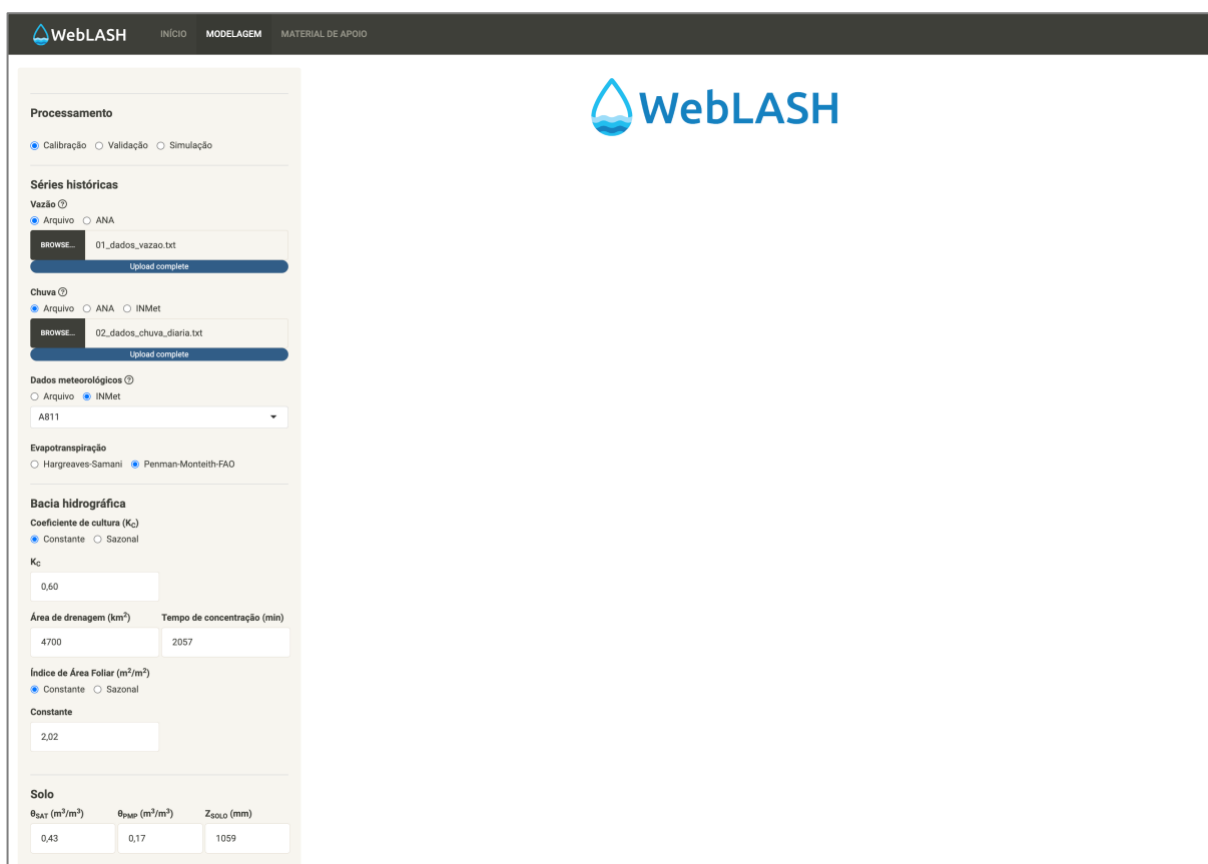
Após isso, o usuário deve escolher a forma de entrada do(s) dado(s) referente(s) ao IAF, podendo, assim como o  $K_c$ , ser escolhido um valor constante médio para a bacia (*Constante*) ou quatro valores de acordo com as estações do ano do Brasil (*Sazonal*), um valor médio de IAF para cada estação do ano (Figura 23).

Figura 23 – Condicionamento dos dados de entrada referentes ao IAF.

Considerando que a equação de Penman-Monteith foi a escolhida para o cálculo da evapotranspiração no estudo de caso da BHRP, o coeficiente  $K_c$  escolhido foi de 0,60, representando a predominância do Campo Nativo na bacia (ALLEN *et al.*, 1998). A área de drenagem de 4.700 km<sup>2</sup> foi obtida com apoio de um *software* de SIG enquanto que o tempo de concentração de 2.057 minutos foi obtido com a equação de Watt e Chow (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013), para bacias de até 5.840 km<sup>2</sup>.

### 5.2.4 Solo

Com relação às informações necessárias acerca do solo da bacia hidrográfica a ser avaliada na calibração/validação/simulação com o modelo, são necessários os valores médios da bacia para a umidade do solo saturado ( $\theta_{SAT}$ ) (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), umidade do solo no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), e profundidade do solo ( $Z_{SOLO}$ ) (mm) (Figura 24).



The screenshot shows the WebLASH web application interface. The top navigation bar includes 'WebLASH', 'INÍCIO', 'MODELAGEM', and 'MATERIAL DE APOIO'. The main content area is titled 'Processamento' and contains several sections for data input and model configuration. The 'Séries históricas' section includes 'Vazão' and 'Chuva' with 'Arquivo' and 'ANA' options, and 'Upload complete' buttons. The 'Dados meteorológicos' section has a dropdown menu set to 'A811'. The 'Evapotranspiração' section has radio buttons for 'Hargreaves-Samani' and 'Penman-Monteith-FAO'. The 'Bacia hidrográfica' section includes a radio button for 'Constante' and a text input for 'Kc' set to '0,60'. The 'Área de drenagem' and 'Tempo de concentração' fields are set to '4700' and '2057' respectively. The 'Índice de Área Foliar' section has a radio button for 'Constante' and a text input set to '2,02'. The 'Solo' section includes three text inputs for 'θSAT' (0,43), 'θPMP' (0,17), and 'ZSOLO' (1059).

Figura 24 – Parâmetros necessários referentes ao solo da bacia hidrográfica de interesse.

Os dados de  $\theta_{SAT}$ ,  $\theta_{PMP}$  e  $Z_{SOLO}$  para a BHRP foram obtidos do estudo de Caldeira (2019), considerando uma média dos valores para as sub-bacias consideradas pela autora.

### 5.2.5 Uso do solo

Para o uso do solo, é necessário apenas o parâmetro de profundidade do sistema radicular ( $Z_{RAD}$ ) considerada para a bacia hidrográfica de interesse (Figura 25). Para tal, é possível entrar apenas com um valor médio de  $Z_{RAD}$  para a bacia (*Constante*) ou quatro valores (*Sazonal*), um valor médio de  $Z_{RAD}$  para cada estação do ano. O parâmetro de  $Z_{RAD}$ , para a BHRP, foi obtido do estudo de Caldeira (2019), considerando uma média dos valores para as sub-bacias consideradas pela autora.

WebLASH INÍCIO MODELAGEM MATERIAL DE APOIO

**Processamento**

☒ Calibração ☐ Validação ☐ Simulação

**Séries históricas**

Vazão ☐

☒ Arquivo ☐ ANA

BROWSE... 01\_dados\_vazao.txt

Upload complete

Chuva ☐

☒ Arquivo ☐ ANA ☐ INMet

BROWSE... 02\_dados\_chuva\_diaria.txt

Upload complete

Dados meteorológicos ☐

☐ Arquivo ☒ INMet

AB11

Evapotranspiração

☐ Hargreaves-Samani ☒ Penman-Monteith-FAO

**Bacia hidrográfica**

Coefficiente de cultura ( $K_c$ )

☒ Constante ☐ Sazonal

$K_c$

0,50

Área de drenagem ( $\text{km}^2$ ) Tempo de concentração (min)

4700 2057

Índice de Área Foliar ( $\text{m}^2/\text{m}^2$ )

☒ Constante ☐ Sazonal

Constante

2,02

**Solo**

| $\theta_{SAT}$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) | $\theta_{PMP}$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) | $Z_{SOLO}$ (mm) |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------|
| 0,43                                       | 0,17                                       | 1059            |

**Uso do solo**

Profundidade do sistema radicular (mm)

☒ Constante ☐ Sazonal

Constante

723

COMPUTAR

Figura 25 – Parâmetro(s) necessário(s) referente(s) ao uso do solo da bacia hidrográfica de interesse.

### 5.3 Menu Material de apoio

O WebLASH apresenta um material de apoio para auxiliar o usuário com algumas escolhas, a saber (Figura 26): i) a localização das estações pluvio e fluviométricas da ANA; ii) a localização das estações meteorológicas do INMet; iii) uma tabela, para a seção dos dados da bacia hidrográfica, com valores de  $K_c$ , oriundos de Allen *et al.* (1998); iv) uma tabela de apoio para escolha do parâmetro do uso solo ( $Z_{RAD}$ ) de acordo com material utilizado nos estudos de Viola (2008), Allen *et al.* (1998) e Mello *et al.* (2008); v) uma tabela de apoio para escolha dos parâmetros do solo ( $\theta_{SAT}$ ,  $\theta_{PMP}$  e  $Z_{SOLO}$ ) de acordo com material apresentado nos estudos de Ottoni *et al.* (2018), Cunha *et al.* (2000), Cunha, Silveira e Severo (2005), Giarola, Silva e IMHOFF (2002), Cunha, Silveira e Severo (2006a), Soares (2018), e Cunha, Silveira e Severo (2006b).

Os mapas de localização das estações da ANA e do INMet foram implementados com artifícios de bibliotecas dinâmicas, ou seja, é possível que o usuário utilize de recursos como *zoom in* e *zoom out* e clique nos pontos para visualizar o código da estação de interesse. Além disso, caso o usuário queira verificar quais estações da ANA e/ou INMet estão próximas à bacia hidrográfica de interesse, basta importar os arquivos referentes ao *shapefile* da mesma (\*.shp, \*.dbf, \*.sbn, \*.sbx, \*.shx, \*.prj) (Figura 27). Esse tipo de apoio é útil para verificar quais estações utilizar no cálculo da chuva média da bacia, por exemplo.



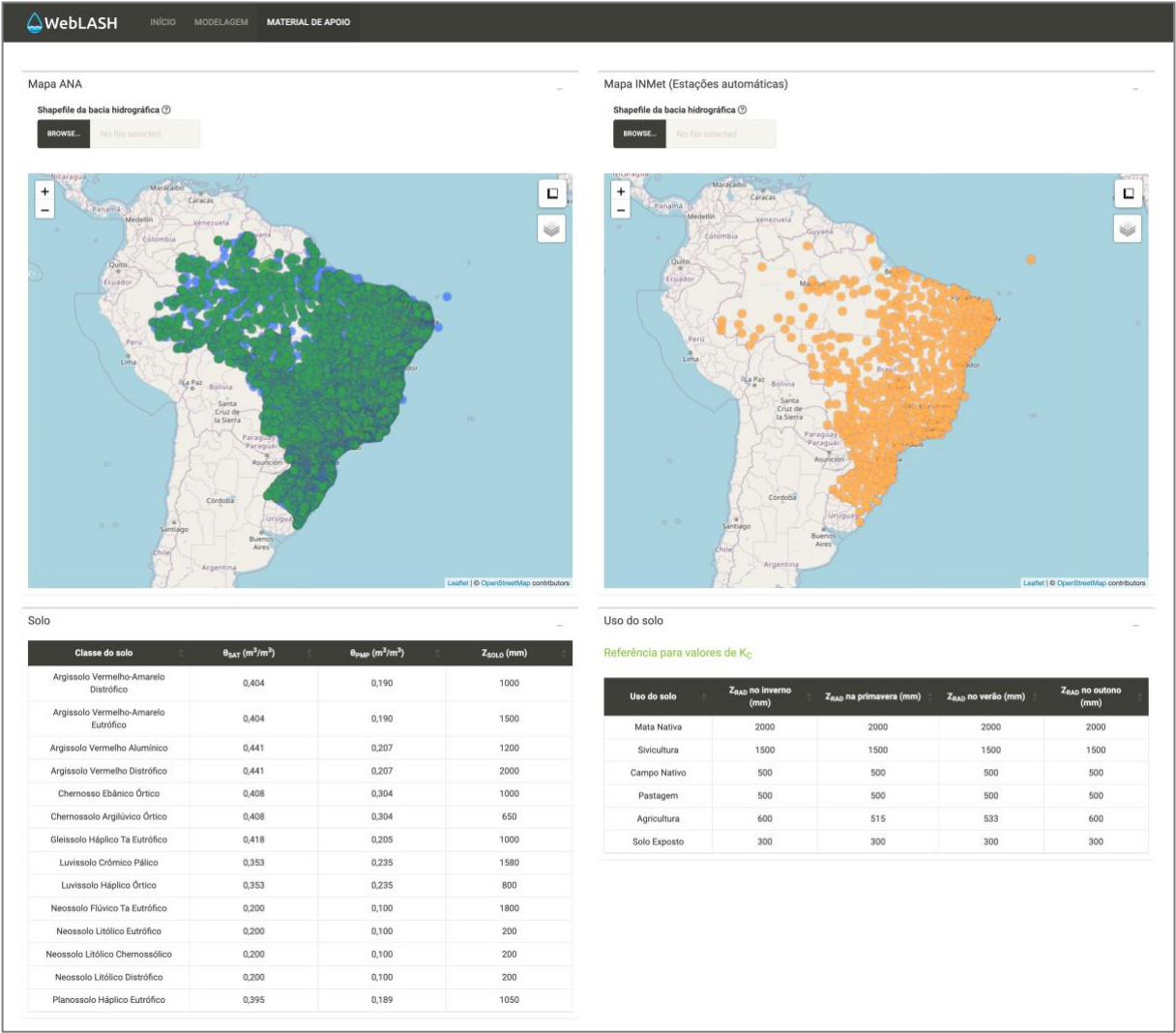


Figura 26 – Menu *material de apoio*.

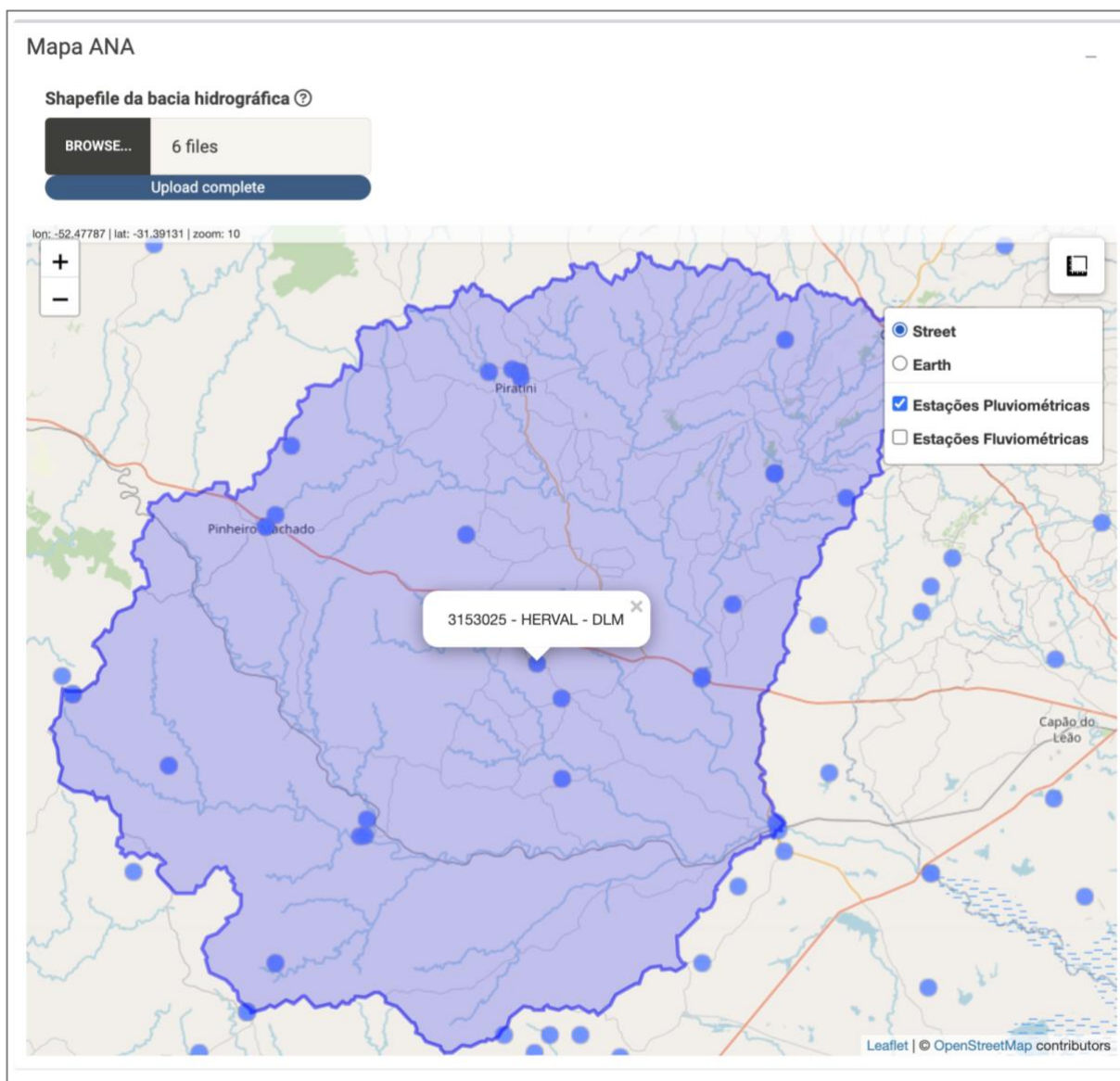
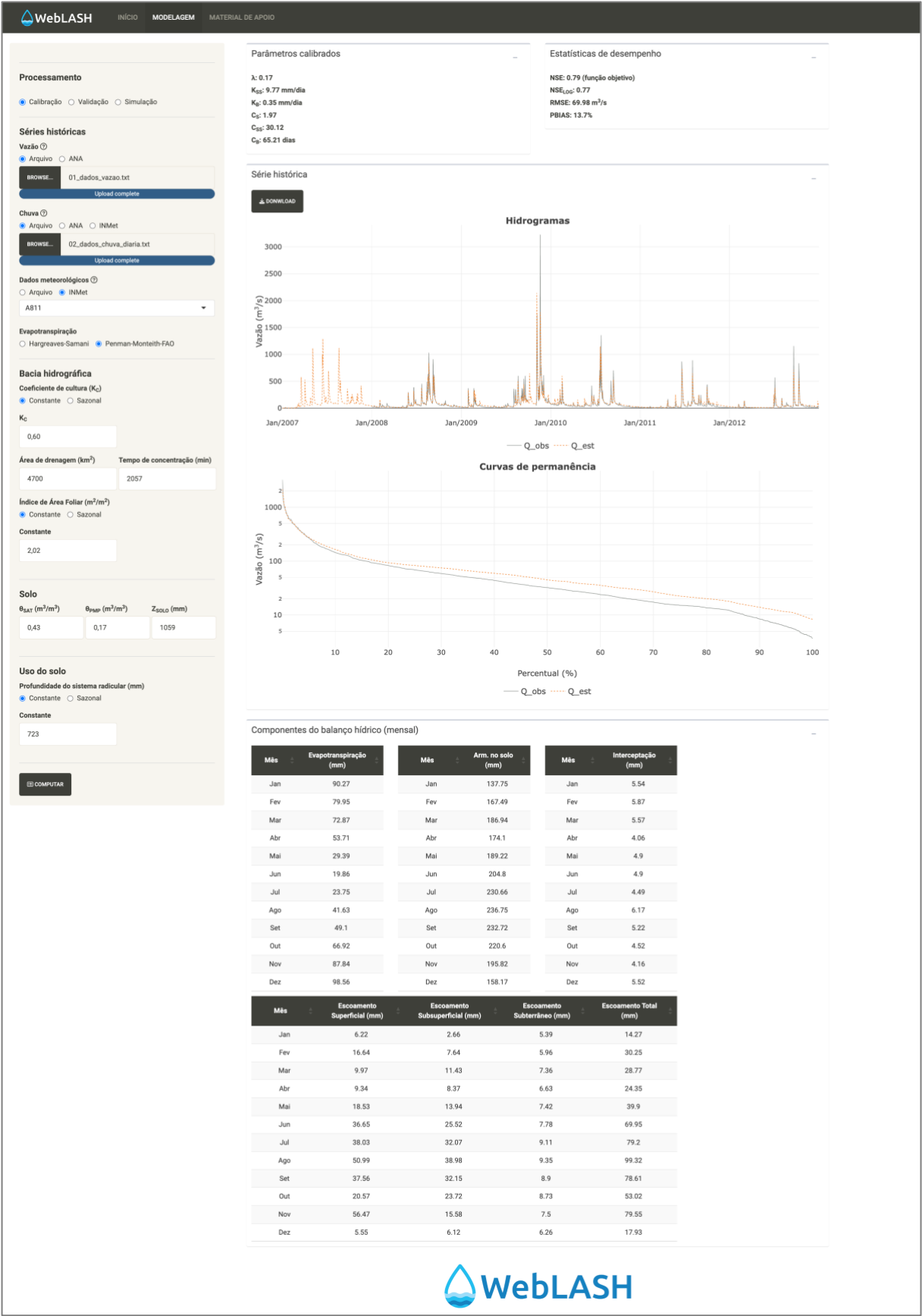


Figura 27 – Estações pluviométricas presentes na BHRP a partir da importação dos *shapefiles* no menu *Material de apoio*.

#### 5.4 Resultados do WebLASH para o estudo de caso na BHRP

A Figura 28 a Figura 31 ilustram os resultados estatísticos e visuais da calibração da BHRP no WebLASH, além dos componentes do balanço hídrico resumidos de forma mensal, de acordo com as informações e metodologias dispostas no Quadro 3.



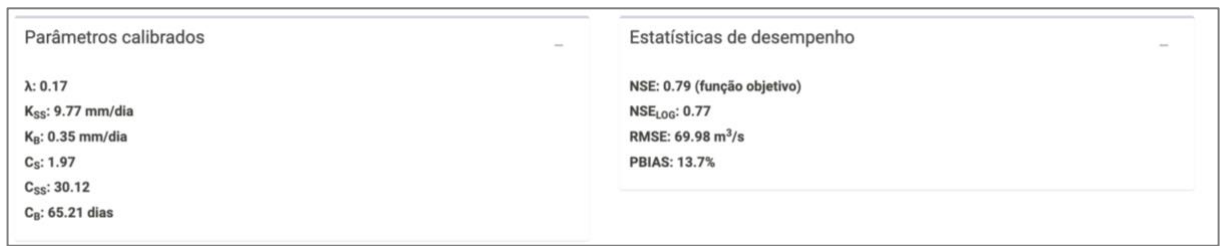


Figura 29 – Zoom in da tela de estatísticas do WebLASH.

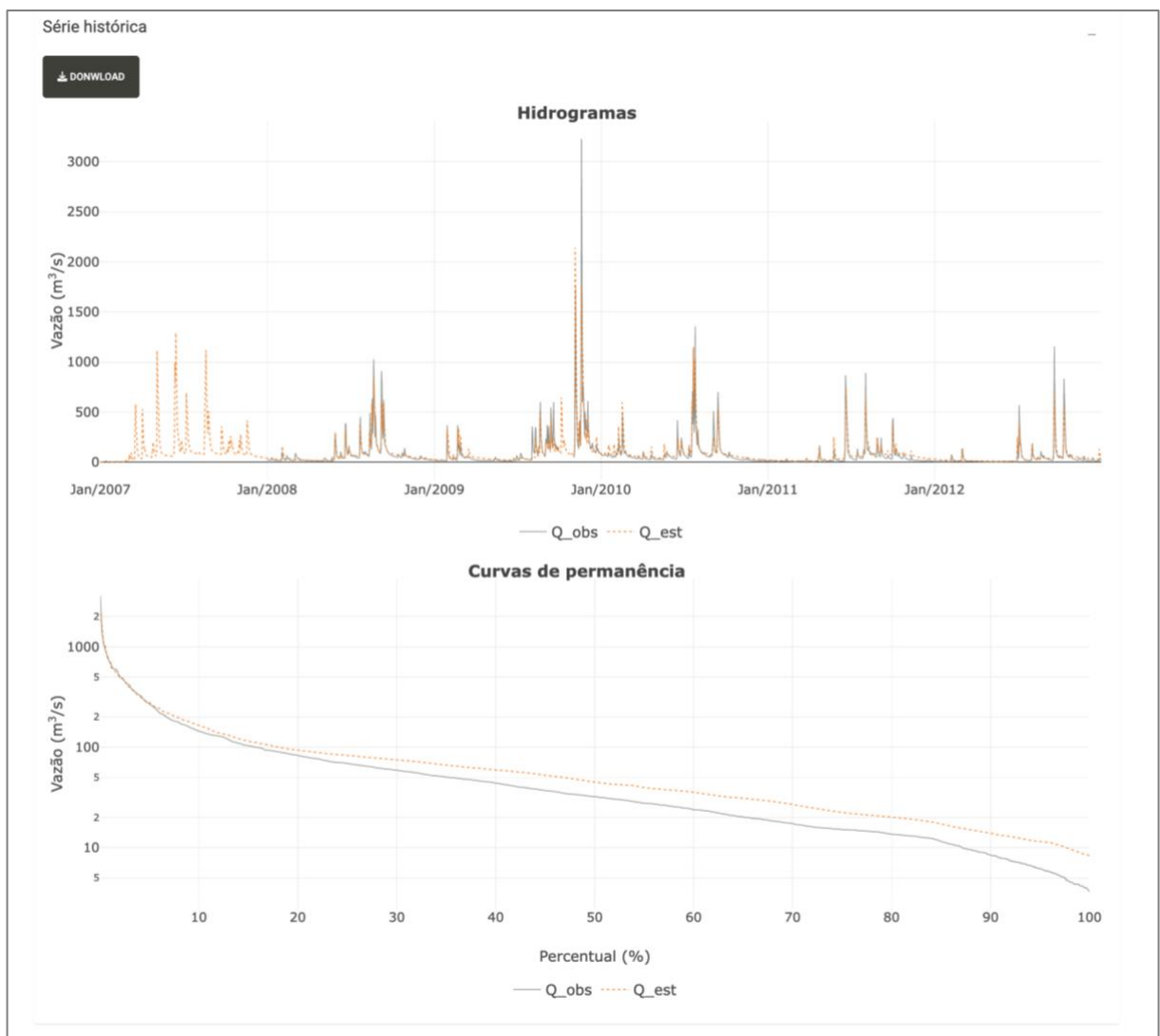


Figura 30 – Zoom in da tela de resultados gráficos do WebLASH.

Componentes do balanço hídrico (mensal)

| Mês | Evapotranspiração (mm) | Mês | Arm. no solo (mm) | Mês | Interceptação (mm) |
|-----|------------------------|-----|-------------------|-----|--------------------|
| Jan | 90.27                  | Jan | 137.75            | Jan | 5.54               |
| Fev | 79.95                  | Fev | 167.49            | Fev | 5.87               |
| Mar | 72.87                  | Mar | 186.94            | Mar | 5.57               |
| Abr | 53.71                  | Abr | 174.1             | Abr | 4.06               |
| Mai | 29.39                  | Mai | 189.22            | Mai | 4.9                |
| Jun | 19.86                  | Jun | 204.8             | Jun | 4.9                |
| Jul | 23.75                  | Jul | 230.66            | Jul | 4.49               |
| Ago | 41.63                  | Ago | 236.75            | Ago | 6.17               |
| Set | 49.1                   | Set | 232.72            | Set | 5.22               |
| Out | 66.92                  | Out | 220.6             | Out | 4.52               |
| Nov | 87.84                  | Nov | 195.82            | Nov | 4.16               |
| Dez | 98.56                  | Dez | 158.17            | Dez | 5.52               |

| Mês | Escoamento Superficial (mm) | Escoamento Subsuperficial (mm) | Escoamento Subterrâneo (mm) | Escoamento Total (mm) |
|-----|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Jan | 6.22                        | 2.66                           | 5.39                        | 14.27                 |
| Fev | 16.64                       | 7.64                           | 5.96                        | 30.25                 |
| Mar | 9.97                        | 11.43                          | 7.36                        | 28.77                 |
| Abr | 9.34                        | 8.37                           | 6.63                        | 24.35                 |
| Mai | 18.53                       | 13.94                          | 7.42                        | 39.9                  |
| Jun | 36.65                       | 25.52                          | 7.78                        | 69.95                 |
| Jul | 38.03                       | 32.07                          | 9.11                        | 79.2                  |
| Ago | 50.99                       | 38.98                          | 9.35                        | 99.32                 |
| Set | 37.56                       | 32.15                          | 8.9                         | 78.61                 |
| Out | 20.57                       | 23.72                          | 8.73                        | 53.02                 |
| Nov | 56.47                       | 15.58                          | 7.5                         | 79.55                 |
| Dez | 5.55                        | 6.12                           | 6.26                        | 17.93                 |

Figura 31 – Zoom in da tela de resultados dos componentes do balanço hídrico do WebLASH.

Em relação aos resultados do WebLASH para a BHRP, pode-se observar os parâmetros calibrados, as métricas de desempenho, os gráficos interativos de hidrograma e curva de permanência, os quais são passíveis de *download*, e os componentes do balanço hídrico mensal. O botão *Download*, no canto superior esquerdo do *box* da *Série histórica*, permite que o usuário realize o *download* das variáveis utilizadas para a construção do hidrograma.

Caldeira (2019), em seu estudo com bacias contíguas no Rio Grande do Sul encontrou, utilizando o LASH, valores de  $\lambda = 0,17$ ,  $K_{SS} = 9,77$  mm/dia,  $K_B = 0,35$  mm/dia,  $C_S = 1,97$ ,  $C_{SS} = 30,12$  e  $C_B = 65,21$  dias para a mesma bacia utilizada como teste do WebLASH. Os valores mais destoantes encontrados neste estudo em relação aos encontrados por Caldeira (2019), foram referentes ao  $K_{SS}$  (9,77 mm/dia) e  $C_S$  (1,97). O  $C_S$  é um parâmetro bastante dependente da discretização espacial da bacia, explicando a discrepância encontrada nesse valor em relação ao estudo de Caldeira (2019). Em suma, essas diferenças tendem a ser aceitáveis, haja vista que a modelagem realizada por Caldeira (2019) tentou representar uma média dos parâmetros por sub-bacia, enquanto neste estudo, a representatividade considerou toda a BHRP. Além disso, deve-se considerar um fator muito importante, a equifinalidade, que nada mais é que a existência de vários conjuntos de parâmetros que proporcionam resultados satisfatórios muito semelhantes entre si, sendo impossível distinguir a melhor combinação (CALDEIRA *et al.*, 2019).

A calibração dos parâmetros de forma concentrada indica que esses valores foram os mesmos para toda a BHRP. O  $\lambda$  está relacionado às perdas de água que ocorrem antes do início da geração de escoamento superficial direto (CALDEIRA *et al.*, 2019). De acordo com Vargas (2021), o  $K_{SS}$  impacta diretamente no cálculo do  $D_{SS}$  (lâmina de escoamento subsuperficial) e este, por sua vez, é diretamente proporcional ao cálculo do  $Q_{SS}$  que corresponde à vazão de saída do reservatório subsuperficial; além disso, o  $K_B$  é análogo ao  $K_{SS}$  nos cálculos de  $D_B$  e  $Q_B$ . O  $K_{SS}$  e o  $K_B$  são responsáveis pela condutividade hidráulica dos reservatórios subsuperficial e subterrâneo, respectivamente, e são fortemente dependentes do solo da bacia (CALDEIRA *et al.*, 2019).

Os três parâmetros  $C_S$ ,  $C_{SS}$  e  $C_B$  possuem relação com o esvaziamento dos reservatórios, ditando se as vazões vão crescer ou decrescer de forma mais suave ou mais rápida (VARGAS, 2021). De acordo com o equacionamento original do modelo LASH, que foi replicada na versão do WebLASH, o  $C_S$  e o  $C_{SS}$  são parâmetros para

corrigir o tempo de esvaziamento dos reservatórios em função do  $t_c$ , isso ocorre, pois, ao invés de calibrar os tempos de esvaziamento destes dois reservatórios, o  $t_c$  é utilizado para balizar a física do processo. O resultado de  $C_s$  foi consideravelmente diferente neste estudo (1,89) em comparação ao estudo de Caldeira (2019) (40,63). Essa diferença pode estar atrelada ao fato de que no estudo de Caldeira (2019) foi utilizada a calibração dos parâmetros sob a abordagem semi-distribuída por sub-bacias, indicando que o modelo tentou calcular o  $C_s$  considerando um tempo de concentração médio para todas as sub-bacias consideradas. Logo, os valores maiores encontrados pela autora condizem com as áreas menores das sub-bacias em comparação à área em sua totalidade considerada para a calibração do  $C_s$  do presente estudo. Por outro lado, o  $C_B$  condiz ao período de recessão do hidrograma, por isso é calculado em dias, representando a capacidade do modelo em representar o trecho final da curva de permanência e é refletida diretamente no valor de  $NSE_{LOG}$ .

As estatísticas de desempenho encontradas comprovam a modelagem eficiente realizada no WebLASH para a BHRP, com valores de NSE de 0,79,  $NSE_{LOG}$  de 0,77, RMSE de 69,98 m<sup>3</sup>/s e PBIAS de 13,7%. Caldeira (2019) encontrou NSE de 0,69,  $NSE_{LOG}$  de 0,69 e RMSE de 85,12 m<sup>3</sup>/s para a mesma bacia, considerando a modelagem semi-distribuída.

Para o WebLASH foram escolhidas as estatísticas NSE,  $NSE_{LOG}$ , RMSE e PBIAS para demonstrar o desempenho do modelo, pois são as estatísticas comumente utilizadas em estudos hidrológicos e se complementam na avaliação dos resultados.

O tempo de calibração foi cerca de 25 minutos, considerando 25 iterações no algoritmo PSO, número este que se mostrou adequado para a convergência da otimização. Todavia, é importante mencionar que a velocidade de otimização do algoritmo implementado no WebLASH é dependente não apenas das características do servidor, mas da velocidade da *internet* do usuário. Quanto aos resultados da aplicação do algoritmo PSO, na Figura 32 é ilustrado a convergência da função objetivo utilizada para otimização dos parâmetros do modelo (NSE), considerando 25 iterações.

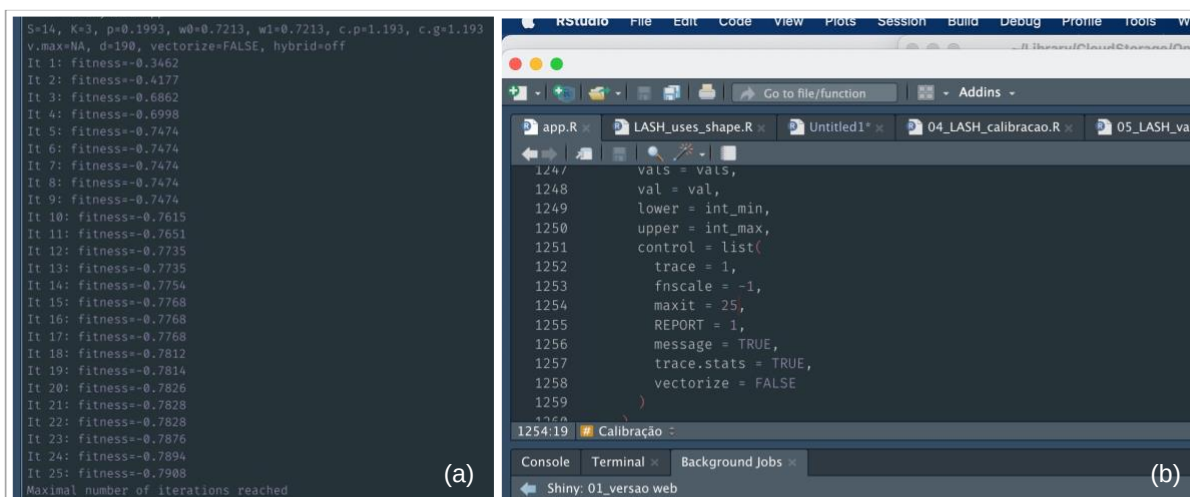


Figura 32 – Evolução da (a) função objetivo e dos (b) parâmetros do WebLASH sob o algoritmo PSO, considerando 25 iterações para a modelagem hidrológica na BHRP.

Pode-se observar, na Figura 32a, que o algoritmo consegue dar um salto grande de evolução da iteração 1 para a iteração 3 até alcançar certa estabilidade a partir da iteração 18. Vale destacar que os resultados negativos de NSE indicam a maximização da estatística por parte do algoritmo, um artifício matemático utilizado para otimizar funções matemáticas.

## 5.5 Destaques do E-LASH e do F-LASH

O E-LASH, conforme mencionado, é a versão do WebLASH executável em máquinas Windows acrescido da possibilidade de realizar a modelagem hidrológica de forma semi-distribuída por sub-bacias (Figura 33). O formato de resultados do E-LASH é o mesmo do WebLASH, com pequenas diferenças na entrada de dados, conforme pode ser observado na Figura 33.



**E-LASH** INÍCIO MODELAGEM MATERIAL DE APOIO

**Processamento**

☒ Calibração
 ☐ Validação
 ☐ Simulação

☐ Concentrada
 ☒ Semi-distribuída

**Séries históricas**

Vazão

☒ Arquivo
 ☐ ANA

BROWSE... 01\_vazao.txt Upload complete

Chuva

☒ Arquivo
 ☐ ANA

BROWSE... 02\_chuva.txt Upload complete

Dados meteorológicos

☒ Arquivo
 ☐ ANA

Temperatura Mínima Temperatura Máxima

BROWSE... 03\_temp\_mi BROWSE... 03\_temp\_mx Upload complete Upload complete

Evapotranspiração

☒ Hargreaves-Samani
 ☐ ANA

**Bacia hidrográfica**

K<sub>c</sub> IAF

BROWSE... 04\_kc.txt BROWSE... 05\_iaf.txt Upload complete Upload complete

Prof. sist. rad. Parâmetros

BROWSE... 06\_prof\_rad BROWSE... 07\_parametros Upload complete Upload complete

COMPUTAR

Figura 33 – Tela de exemplo do E-LASH para a BHRP considerando a modelagem de forma semi-distribuída.

Quando da escolha do usuário pela modelagem concentrada, todas as opções subsequentes são exatamente as mesmas disponíveis no WebLASH. No entanto, caso a modelagem seja a semi-distribuída, as opções ficam condicionadas apenas à entrada de dados do usuário, com exceção da série de vazão que ainda pode ser obtida junto à ANA. Os arquivos de chuva, temperatura mínima e máxima,  $K_c$ , IAF e profundidade do sistema radicular devem seguir o formato da Figura 34 com separador decimal vírgula, onde a primeira coluna é referente à data e as demais, o a variável para cada sub-bacia em que a bacia de interesse foi dividida. O número de sub-bacias para a modelagem é contabilizado através do número de colunas descontando a primeira, que é a data.

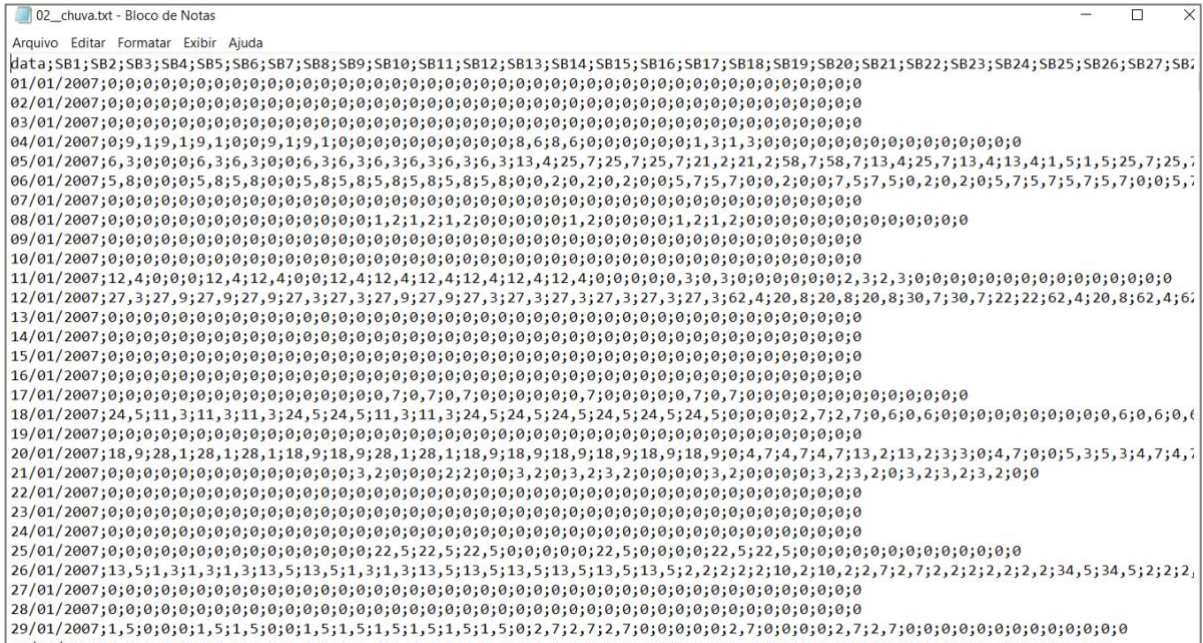


Figura 34 – Exemplo de como as séries históricas de chuva, temperaturas mínimas e máximas, e os parâmetros  $K_c$ , IAF e profundidade do sistema radicular devem ser compatibilizadas para a modelagem por sub-bacias no E-LASH.

Os valores de  $K_c$ , IAF e profundidade do sistema radicular foram considerados como séries temporais por sub-bacia para poder abranger a sazonalidade das estações do ano que podem influenciar nesses parâmetros.

Já os valores dos parâmetros referentes à bacia solo e uso do solo são compatibilizados em apenas um arquivo (Figura 35), sendo estes: latitude, altitude média, área de drenagem, tempo de concentração,  $\theta_{SAT}$ ,  $\theta_{PMP}$ ,  $Z_{SOLO}$ .

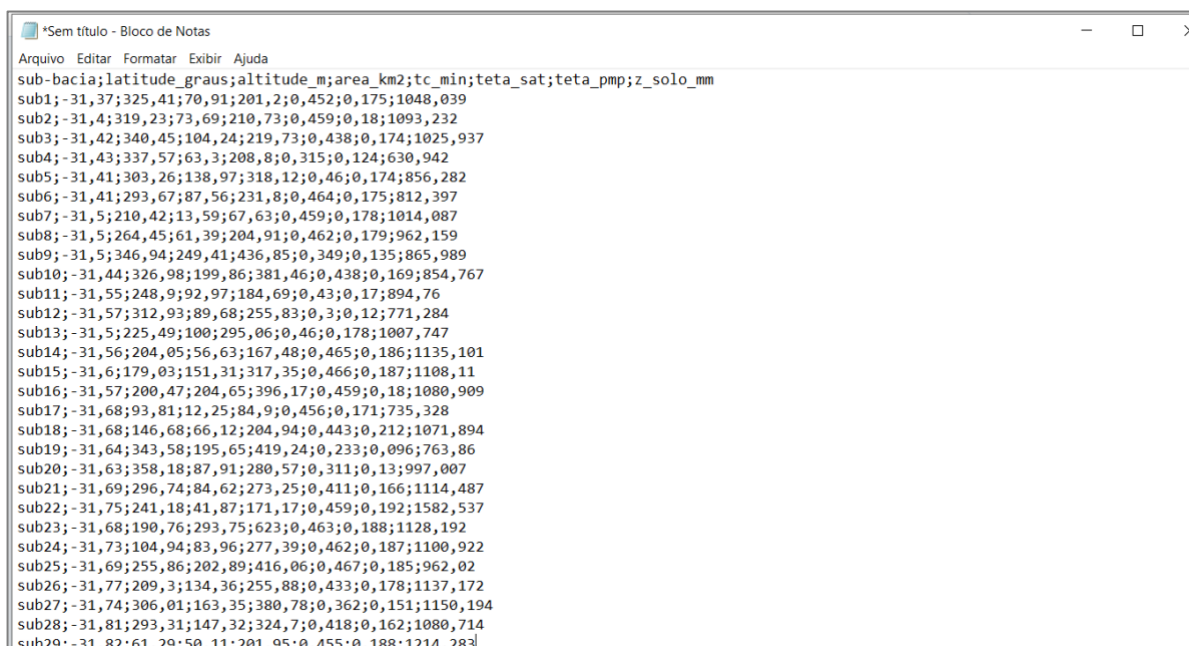


Figura 35 – Exemplo de como os parâmetros de latitude, altitude média, área de drenagem, tempo de concentração,  $\theta_{SAT}$ ,  $\theta_{PMP}$ ,  $Z_{SOLO}$  para a modelagem por sub-bacias no E-LASH.

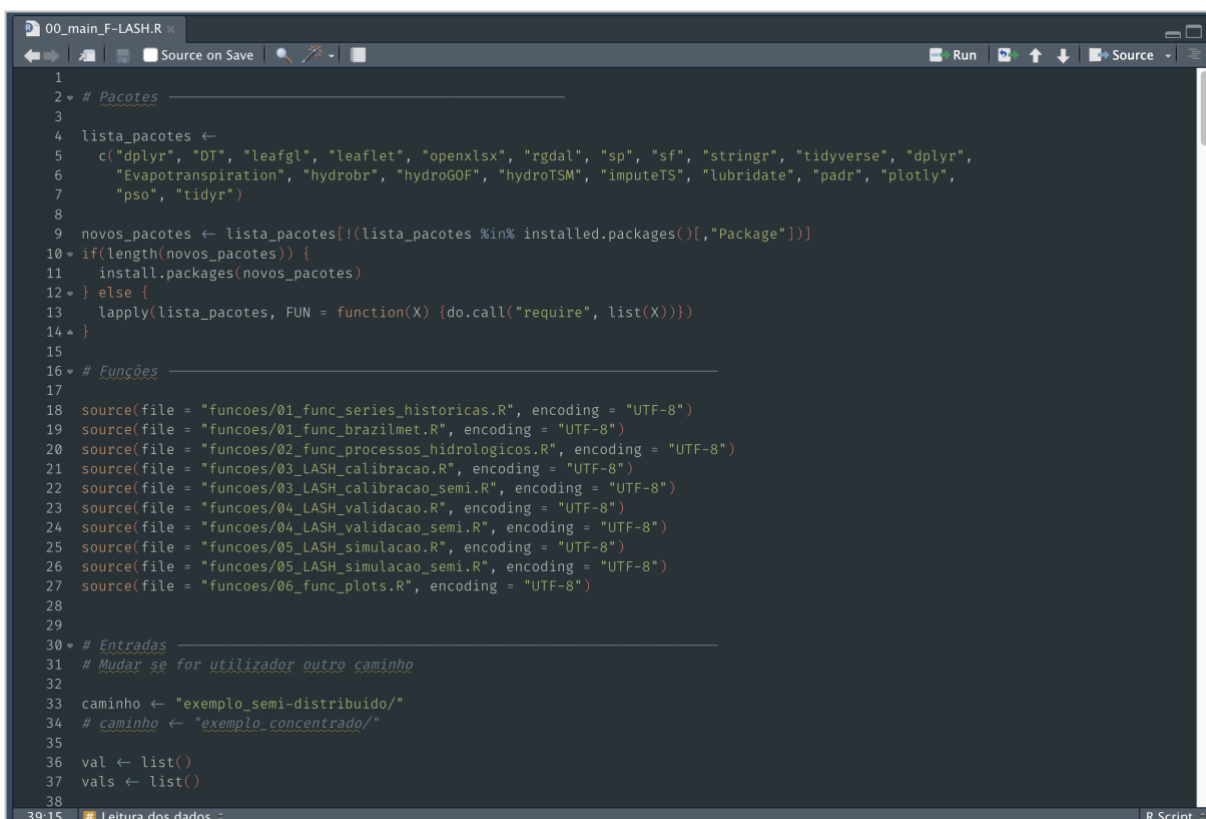
Quanto ao F-LASH, este é basicamente o código estruturado do E-LASH, com as mesmas opções de entrada, que contém as funções:

- 01\_func\_series\_historicas;
- 02\_func\_brazilmet;
- 03\_func\_processos\_hidrologicos;
- 04\_LASH\_calibracao;
- 05\_LASH\_validacao;
- 06\_LASH\_simulacao; e
- 07\_func\_plots

Os códigos referentes às funções de número 04, 05 e 06 possuem suas versões para a modelagem semi-distribuída. A principal função do E-LASH é denominada 00\_main\_F-LASH, aonde é possível verificar todas as possibilidades de dados de entrada, bem como as chamadas das funções (Figura 36). Nesse sentido, basta o usuário adaptar os caminhos e nomes de arquivos, conforme indicado e comentado no código, para computar a modelagem.

Todas as opções de entrada constam no F-LASH, mas apenas uma de cada não está comentada, ou seja, está como *default* do código. Logo, o usuário precisa

verificar quais são as linhas de código para que sua base de dados possa ser utilizada no F-LASH, mas isso é bastante simples, pois todo o código se encontra comentado. O F-LASH é indicado para usuários que possuam experiência com R para que consigam explorar todas as possibilidades das funções e resultados da modelagem.



```

1
2 # Pacotes
3
4 lista_pacotes <-
5   c("dplyr", "DT", "leaflet", "openxlsx", "rgdal", "sp", "sf", "stringr", "tidyverse", "dplyr",
6     "Evapotranspiration", "hydrobr", "hydroGOF", "hydroTSM", "imputeTS", "lubridate", "padr", "plotly",
7     "pso", "tidyr")
8
9 novos_pacotes <- lista_pacotes[!(lista_pacotes %in% installed.packages()[,"Package"])]
10 if(length(novos_pacotes)) {
11   install.packages(novos_pacotes)
12 } else {
13   lapply(lista_pacotes, FUN = function(X) {do.call("require", list(X))})
14 }
15
16 # Funções
17
18 source(file = "funcoes/01_func_series_historicas.R", encoding = "UTF-8")
19 source(file = "funcoes/01_func_brazilmet.R", encoding = "UTF-8")
20 source(file = "funcoes/02_func_processos_hidrologicos.R", encoding = "UTF-8")
21 source(file = "funcoes/03_LASH_calibracao.R", encoding = "UTF-8")
22 source(file = "funcoes/03_LASH_calibracao_semi.R", encoding = "UTF-8")
23 source(file = "funcoes/04_LASH_validacao.R", encoding = "UTF-8")
24 source(file = "funcoes/04_LASH_validacao_semi.R", encoding = "UTF-8")
25 source(file = "funcoes/05_LASH_simulacao.R", encoding = "UTF-8")
26 source(file = "funcoes/05_LASH_simulacao_semi.R", encoding = "UTF-8")
27 source(file = "funcoes/06_func_plots.R", encoding = "UTF-8")
28
29
30 # Entradas
31 # Mudar se for utilizador outro caminho
32
33 caminho <- "exemplo_semi-distribuido/"
34 # caminho <- "exemplo_concentrado/"
35
36 val <- list()
37 vals <- list()
38
39:15 # Leitura dos dados

```

Figura 36 – Exemplo de estrutura do código 00\_main\_F-LASH.

Considerando que o E-LASH e o F-LASH possuem a opção de calibração semi-distribuída, esta pode demorar cerca de 24h ou mais a partir do número de sub-bacias da bacia hidrográfica de interesse. No entanto, a partir do fato de serem um executável e um conjunto de funções R, respectivamente, e não dependerem de um servidor *online*, o tempo de processamento é factível.

A ideia inicial deste estudo era utilizar as mesmas características de programação que foi realizada no M-LASH para otimizar o tempo de processamento, mas a linguagem R possui mecanismos diferentes, que não permitem considerar as mesmas premissas, *e.g.* globalização das variáveis. Logo, a continuidade do trabalho também irá considerar formas de melhoria do tempo de processamento da modelagem semi-distribuída no E-LASH e no F-LASH.

## 5.6 Aplicações do WebLASH, E-LASH e F-LASH

Dentre as aplicações do WebLASH e de seus complementos, pode-se citar algumas, a saber: i) utilização do WebLASH para verificar, de forma rápida, a adequação da bacia à calibração concentrada para posterior utilização do E-LASH ou do F-LASH, haja vista que a semi-distribuída tende a melhorar ainda mais as estatísticas de desempenho e, conseqüentemente, a parametrização do modelo; ii) modelagem em cenários de mudanças climáticas; iii) modelagem para preenchimento de falhas de vazão; e/ou iv) modelagem para quantificar disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica de interesse.

Ainda que o público principal do WebLASH seja de profissionais da área de consultoria, além de professores e alunos de ensino na graduação e pós-graduação, o E-LASH e o F-LASH podem dar suporte nessas áreas também. A ideia é que o usuário possa escolher o ambiente em que se sentir mais confortável para trabalhar, dispondo do cerne principal de aplicação do LASH como um todo, simplificado e otimizado nos três formatos disponibilizados. No caso do ensino, os docentes dispõem de uma ferramenta rica em termos metodológicos dos principais conceitos da hidrologia e modelagem hidrológica que pode dar suporte aos alunos em projetos que retratam, com proximidade, as aplicações no mercado de trabalho.

## 6 Conclusões

Frente à implementação e teste do WebLASH, pode-se concluir que:

- i. A simplificações e melhorias metodológicas conduzidas no desenvolvimento do WebLASH se mostraram eficientes frente aos resultados de estatísticas e parâmetros calibrados na BHRP, podendo ser replicado para outras bacias hidrográficas do Brasil;
- ii. Os dois complementos que possuem, além da opção de modelagem concentrada, a opção de modelagem semi-distribuída, o E-LASH e o F-LASH tendem a expandir, em termos de metodologia, as modelagens que podem ser realizadas a partir do WebLASH;
- iii. O WebLASH possui grande potencial de ser aplicado na área da consultoria, possibilitando que os profissionais da área possam utilizar o modelo de forma imediata, para testes, e posteriormente utilizar o E-LASH para conduzir uma modelagem mais detalhadas;
- iv. O WebLASH possui grande aplicação no ensino superior, dando suporte inicial aos alunos que estão aprendendo as premissas da modelagem hidrológica;
- v. O complemento F-LASH alcança usuários programadores, difundindo as potencialidades do modelo em termos de desenvolvimento computacional.

## **7 Considerações finais**

Por fim, apresenta-se uma síntese de contribuições desse estudo, sendo:

- i. A implementação do LASH em uma plataforma web e dois complementos para oferecer ao usuário de acordo com seus conhecimentos ou não em programação; e
- ii. A possibilidade de disseminar o LASH em todas as esferas de atuação do profissional da área, sendo que a consultoria e o ensino foram os maiores contemplados nesse estudo.

## Referências

- ALBUQUERQUE, P. E. P.; COELHO, E. A. Planilha para obtenção de coeficiente de cultura (Kc) para culturas de ciclo anual, segundo método FAO, para as condições climáticas brasileiras. Embrapa Milho e Sorgo-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2021.
- ALLEN, R. G *et al.* **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome: FAO, 1998. 300 p.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. Goodness-of-fit criteria for hydrological models: Model calibration and performance assessment. **Journal of Hydrology**, v. 600, p. 126674, 2021. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126674
- APPELHANS, T. Package leafgl: High-Performance 'WebGL' Rendering for Package 'leaflet'. 2020. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/leafgl/index.html>
- ARABZADEH, R.; ARAGHINEJAD, S. Package 'RHMS': Hydrologic Modelling System for R Users. 2019. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/RHMS/index.html>.
- ARNOLD, J. G *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment: part I: model development. **Journal of American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.
- ASTAGNEAU, P. C. *et al.* Hydrology modelling R packages—a unified analysis of models and practicalities from a user perspective. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, n. 7, p. 3937-3973, 2021.
- ATTALI, D. *et al.* Package shinyalert: Easily Create Pretty Popup Messages (Modals) in 'Shiny'. 2021.
- ATTALI, D. Package shinyjs: Easily Improve the User Experience of Your Shiny Apps in Seconds. 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/shinyjs/index.html>
- BACHER, E. Package prompter: Add Tooltips in 'Shiny' Apps with 'Hint.css'. 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/prompter/index.html>
- BAILEY, E. Package shinyBS: Twitter Bootstrap Components for Shiny. 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/shinyBS/index.html>
- BECKER, R. A.; CHAMBERS, J. M.; WILKS, A. R. The New S Language. Wadsworth & Brooks/Cole. Computer Science Series, Pacific Grove, CA, 1988.
- BENDTSEN, C. Package pso: Particle Swarm Optimization. 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/pso/index.html>



BESKOW, S *et al.* Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. **Catena**, v. 86, p. 160–171, 2011. DOI: 10.1016/j.catena.2011.03.010.

BESKOW, S. LASH Model: a hydrological simulation tool in GIS framework. 2009. 118p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavra, Minas Gerais.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D. Development, sensitivity and uncertainty analysis of LASH model. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 265–274, 2011. DOI: 10.1590/S0103-90162011000300001.

BIGIARINI, M. Z. Package hydroGOF: Goodness-of-Fit Functions for Comparison of Simulated and Observed Hydrological Time Series. 2020. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/hydroGOF/index.html>

BIGIARINI, M. Z. Package hydroTSM: Time Series Management, Analysis and Interpolation for Hydrological Modelling. 2020. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/hydroTSM/index.html>

CALDEIRA, T. L *et al.* LASH hydrological model: an analysis focused on spatial discretization. **Catena**, v. 173, p. 183-193, 2019. DOI: 10.1016/j.catena.2019.10.009.

CALDEIRA, T. L. *et al.* Modelagem hidrológica determinística chuva-vazão em bacias hidrográficas: uma abordagem introdutória. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 5, n. 1, p. 22-32, 2018. DOI: 10.15210/RBES.V5i1.13231.

CALDEIRA, T. L. 2016. **Aprimoramento computacional do modelo Lavras Simulation of Hydrology (LASH): aplicação em duas bacias do Rio Grande do Sul** (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pelotas). 2016. 247f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

CALDEIRA, T. L. **Impacto das mudanças climáticas sobre a hidrologia de sub-bacias da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo**. 2019. 243f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

CARVALHO, L. G. *et al.* Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, p. 456-465, 2011.

CHANG, W. *et al.* Package ‘shiny’: Web Application Framework for R. 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/shiny/index.html>.

CHANG, W. *et al.* Package shinydashboard: Create Dashboards with 'Shiny'. 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/shinydashboard/index.html>

CHANG, W. *et al.* Package shinythemes: Themes for Shiny. 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/shinythemes/index.html>

CHANG, J. *et al.* Package shiny: Web Application Framework for R. 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/shiny/index.html>

CHENG, J. *et al.* Package leaflet: Create Interactive Web Maps with the JavaScript 'Leaflet' Library. 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/leaflet/index.html>

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.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v. 1, p. 336, 2013.

COLLISCHONN, W. *et al.* The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007. DOI: 10.1623/hysj.52.5.878.

CORON, L. *et al.* Package 'airGR': Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/airGR/index.html>.

CUNGE, J. A. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). **Journal of Hydraulic Research**, v. 7, n. 2, p. 205-230, 1969.

CUNHA, F.F.; MAGALHÃES, F. F.; DE CASTRO, M. A. Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul-MS. **Revista Engenharia na Agricultura-Reveng**, v. 21, n. 2, p. 159-172, 2013.

CUNHA, N. G. *et al.* **Estudo dos solos do município de Camaquã**. Pelotas: EMBRAPA/CPACT, 2000. 99 p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S. **Estudo dos solos das regiões do planalto sul-rio-grandense e planícies costeiras**. Pelotas: EMBRAPA/CPACT, 2006a. 43 p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S. **Estudo dos solos do município de Encruzilhada do Sul**. Pelotas: EMBRAPA/CPACT, 2005. 83 p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S. **Estudo dos solos do município de São Lourenço do Sul**. Pelotas: EMBRAPA/CPACT, 2006b. 47 p.

DAI, H. P. *et al.* Effects of random values for particle swarm optimization algorithm. **Algorithms**, v. 11, n. 2, p. 23, 2018. DOI: 10.3390/a11020023.

DELAIGUE, O. *et al.* Package 'airGRteaching': Teaching Hydrological Modelling with the GR Rainfall-Runoff Models ('Shiny' Interface Included). 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/airGRteaching/index.html>.

DELAIGUE, O. *et al.* Using the R package airGRteaching for teaching hydrology with lumped hydrological models. In: *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2018. p. 5074. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/shinyalert/index.html>  
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.

ELECTRON - Build cross-platform desktop apps with JavaScript, HTML, and CSS. Disponível em: <https://www.electronjs.org/docs/latest/tutorial/quick-start>.

FERDOWSI, A. *et al.* A survey of pso contributions to water and environmental sciences. In: **Computational Intelligence for Water and Environmental Sciences**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 85-102.

FILGUEIRAS, R. *et al.* Package BrazilMet: Download and Processing of Automatic Weather Stations (AWS) Data of INMET-Brazil. 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/BrazilMet/index.html>

FUNG, D. S. Methods for the estimation of missing values in time series. Edith Cowan University, 2006.

FUKA, D. R. *et al.* SWAT model: A Multi-Operating System, Multi-Platform SWAT Model Package in R. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 50, n. 5, p. 1349-1353, 2014.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 885-893, 2002.

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.

GUO, D. *et al.* Package Evapotranspiration: Modelling Actual, Potential and Reference Crop Evapotranspiration. 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/Evapotranspiration/index.html>

HAMMAN, J. J.; NIJSSEN, B.; BOHN, T. J.; GERGEL, D. R.; AND MAO, Y. The Variable Infiltration Capacity model version 5 (VIC-5): infrastructure improvements for new applications and reproducibility. **Geoscientific Model Development**, v. 11, n. 8, p. 3481-3496, 2018. Doi:10.5194/gmd-11-3481-2018.

IHAKA, R; GENTLEMAN, R. R: a language for data analysis and graphics. **Journal of computational and graphical statistics**, v. 5, n. 3, p. 299-314, 1996.

KALMAN, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. **Journal of Basic Engineering**, 81, 35-45, 1960.

KRAUSKOPF NETO, Ricardo. **Atualização de modelos chuva-vazão-propagação com estimadores de estado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.

KEMMER, G; KELLER, S. Nonlinear least-squares data fitting in Excel spreadsheets. **Nature Protocols**, v. 5, n. 2, p. 267-281, 2010.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. IEEE, 1995. p. 1942-1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.

LEGATES, D. R.; MCCABE JR, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

LIGHTHILL, M. J; WHITHAM, G. B. On kinematic waves I. Flood movement in long rivers. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 229, n. 1178, p. 281-316, 1955a. DOI: 10.1098/rspa.1955.0088.

LIGHTHILL, M. J; WHITHAM, G. B. On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 229, n. 1178, p. 317-345, 1955b. DOI: 10.1098/rspa.1955.0089.

LILOVSKI, N. 2022. Package dashboardthemes: Customise the Appearance of 'shinydashboard' Applications using Themes. Disponível: <https://cran.r-project.org/web/packages/dashboardthemes/index.html>

MELATI, M. D. *et al.* Monitoring groundwater storage in a fractured volcanic aquifer system. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 3, p. 385, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-10978-4>.

MELO, P. A. *et al.* On the performance of conceptual and physically based modelling approach to simulate a headwater catchment in Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 114, p. 103683, 2022.

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.

METCALFE, P.; BEVEN, K.; FREER, J. Package ‘dynatopmodel’: Implementation of the Dynamic TOPMODEL Hydrological Model. 2018. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/dynatopmodel/index.html>.

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.

MORIASI, D. N *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Trans. ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. DOI: 10.13031/2013.23153.

MORIASI, D. N *et al.* Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 6, p. 1763-1785, 2015. DOI: 10.13031/trans.58.10715.

MORITZ, S. *et al.* Package imputeTS: Time Series Missing Value Imputation. 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/imputeTS/index.html>

MOURA, Maíra Martim de. R-LASH: implementação e aplicação do modelo hidrológico em linguagem R. 2023. 142f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

MYERS, D. T. *et al.* Choosing an arbitrary calibration period for hydrologic models: How much does it influence water balance simulations? **Hydrological Processes**, v. 35, n. 2, p. e14045, 2021. DOI: 10.1002/hyp.14045

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.

NIELSEN, Aileen. **Análise Prática de Séries Temporais: Predição com Estatística e Aprendizado de Máquina**. [SI]. 2021.

OTTONI, M. V. *et al.* Hydrophysical database for Brazilian soils (HYBRAS) and pedotransfer functions for water retention. **Vadose Zone Journal**, v.17, n.1, 170095, 2018. DOI: 10.2136/vzj2017.05.0095.

LOUDIN, L.; MICHEL, C.; ANCTIL, F. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? **Journal of Hydrology**, v.303, n.1-4, p.290-306, 2005. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.026

PEBESMA, E. *et al.* Package sf: Simple Features for R. 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/sf/index.html>

PERRIER, V. *et al.* Package shinyWidgets: Custom Inputs Widgets for Shiny. 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/shinyWidgets/index.html>

RACINE, J. S. RStudio: a platform-independent IDE for R and Sweave. **Journal of Applied Econometrics**, v. 27, n. 1, p. 167-172, 2012.

RAFIEI E. A. *et al.* Uncertainty analysis of hydrological modeling in a tropical area using different algorithms. **Frontiers of Earth Science**, v. 12, p. 661-671, 2018.

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.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Conceitos Básicos de Modelagem Hidrológica. In: Margareth Simões Penello Meirelles; Gilberto Camara; Cláudia Maria de Almeida.

(Org.). Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais. 1ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007, v. 11, p. 529-556.

SALI, A. *et al.* Package shinycssloaders: Add Loading Animations to a 'shiny' Output While It's Recalculating 2020. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/shinycssloaders/index.html>

SANTOS, R. R.; MOURA, M. M.; CALDEIRA, T. L.; VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Aprimoramentos computacionais da ferramenta ArcLASH. In *Anais XXVIII Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas*, 2019.

SCHAUBERGER, P. *et al.* Package openxlsx: Read, Write and Edit xlsx Files. 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/openxlsx/index.html>

SCHÜRZ C (2019). SWATplusR: Running SWAT2012 and SWAT+ Projects in R. doi:10.5281/zenodo.3373859, R package version 0.2.7, <https://github.com/chrisschuerz/SWATplusR>.

SCS. **National Engineering Handbook**. Washington: Soil Conservation Service/USDA, 1971.

SOARES, M. F. **Variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos e do carbono orgânico do solo de uma bacia hidrográfica de cabeceira em Canguçu – RS**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, p. 102. 2017.

SIEVERT, C. Package plotly: Create Interactive Web Graphics via 'plotly.js'. 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/plotly/index.html>

SILVA, P. Package shiny.pwa: Progressive Web App Support for Shiny. 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/shiny.pwa/index.html>

SILVA, T. P. *et al.* Best management practices to reduce soil erosion and change water balance components in watersheds under grain and dairy production. **International Soil and Water Conservation Research**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.06.003>.

SLATER, L. J. *et al.* Using R in hydrology: a review of recent developments and future directions. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 7, p. 2939-2963, 2019. DOI: 10.5194/hess-23-2939-2019.

STEEL, G. L.; SUSSMAN, G. J. SCHEME: An interpreter for the extended lambda calculus. *Memo349, MIT Artificial Intelligence Laboratory. SteelScheme: An Interpreter for the Extended Lambda Calculus*. 1975.

SPINU, V. *et al.* Package lubridate: Make Dealing with Dates a Little Easier. 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/lubridate/lubridate.pdf>

TEIXEIRA, L. L.; SIQUEIRA, P. H. Previsão de Séries de Vazões com a Meta-heurística PSO. *RECEN-Revista Ciências Exatas e Naturais*, v. 17, n. 2, p. 207-224, 2015.

TEODORO, Valiana Alves. **Comparação de método de imputação para dados de precipitação diária**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2019.

THIEURMEL, B.; PERRIER, V. Package shinymanager: Authentication Management for 'Shiny' Applications. 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/shinymanager/index.html>

THOEN, E. Package padr: Quickly Get Datetime Data Ready for Analysis. 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/padr/index.html>

TOUM, E. Package 'HBV.IANIGLA': Modular Hydrological Model. 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/HBV.IANIGLA/index.html>.

VARGAS, Marcelle Martins. **Concepção do modelo hidrológico LASH em MATLAB®: aprimoramento da propagação em rios e da calibração**. 2021. 171f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

VARGAS, M. M. *et al.* Capability of LISEM to estimate flood hydrographs in a watershed with predominance of long-duration rainfall events. **Natural Hazards**, p. 1-22, 2021.

VARGAS, M. M. *et al.* M-LASH: Hydrological and computational enhancements of the LASH model. **Environmental Modelling & Software**, p. 105774, 2023. DOI: 10.1016/j.envsoft.2023.105774.

VARGAS, M. M. *et al.* SYHDA—System of Hydrological Data Acquisition and Analysis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, 2019. DOI: 10.1590/2318-0331.241920180152.

VIEIRA, N. P. A. **LASH model using hydrological response units (HRU) for simulation of the climate change impacts on the hydrology of the Upper-Middle Grande River basin, Southeast Brazil**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Lavras. Lavras, Minas Gerais.

VIOLA, M. R. 2008. **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.

VRUGT; J. A.; ROBINSON, B. A. Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimethod search. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 3, p. 708-711, 2007. DOI: 10.1073/pnas.0610471104.

WANG, Dongshu; TAN, Dapei; LIU, Lei. Particle swarm optimization algorithm: an overview. **Soft computing**, v. 22, p. 387-408, 2018. DOI: 10.1007/s00500-016-2474-6.

WICKHAM, H. Package stringr: Simple, Consistent Wrappers for Common String Operations. 2022. Disponível: <https://cran.r-project.org/web/packages/stringr/index.html>

WICKHAM, H. Package tidyverse: Easily Install and Load the 'Tidyverse'. 2022. Disponível: <https://cran.r-project.org/web/packages/devtools/index.html>

XIE, Y. Package DT: A Wrapper of the JavaScript Library DataTables. 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/DT/index.html>

ZHANG, X. *et al.* Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 23, n. 3, p. 430-441, 2009.

ZHONG, R. *et al.* Package VIC5: The Variable Infiltration Capacity (VIC) Hydrological Model. 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/VIC5/index.html>