UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GABRIEL DE MIRANDA ALCÂNTARA

**Modelagem dos impactos hidrológicos decorrentes de alterações do uso e
ocupação do solo em bacia hidrográfica rural**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2018

GABRIEL DE MIRANDA ALCÂNTARA

**Modelagem dos impactos hidrológicos decorrentes de alterações do uso e
ocupação do solo em bacia hidrográfica rural**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e
Saneamento.

Orientador: Prof. Tit. Edson Wendland

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

AA347m	<p>Alcantara, Gabriel de Miranda</p> <p>Modelagem dos impactos hidrológicos decorrentes de alterações do uso e ocupação do solo em bacia hidrográfica rural / Gabriel de Miranda Alcantara; orientador Edson Cezar Wendland. São Carlos, 2018.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.</p> <p>1. Modelagem chuva-vazão. 2. Escoamento superficial. 3. Diferentes usos e ocupação do solo. 4. JAMS/J2K. 5. Bacia do Ribeirão da Onça. I. Título.</p>
--------	---

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **GABRIEL DE MIRANDA ALCANTARA**.

Título da dissertação: "Modelagem dos impactos hidrológicos decorrentes de alterações do uso e ocupação do solo em bacia hidrográfica rural".

Data da defesa: 19/10/2018.

Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Ademir Paceli Barbassa**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Prof. Dr. **José Eduardo Alamy Filho**
(Universidade Federal de Uberlândia/UFU)

Resultado:

Aprovado

APROVADO

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Dr. **Eduardo Mario Mendiando**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Aos meus pais e ao meu irmão.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Edson Wendland por todo o suporte fornecido no período de execução deste trabalho, que me permitiu desenvolver senso crítico e aprimorar meu conhecimento.

Aos meus colegas do Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC) pelos conselhos, trocas de informações e, acima de tudo, amizade.

Aos técnicos, Roberto Bérghamo e Marcelo Miky (e seu colega, Lucas Carvalho), por todas as colaborações e ideias durante esses últimos dois anos.

Aos Professores Sven Kralisch, Annika Künne e Manfred Fink da Universidade de Jena e ao Professor Paul Wagner da Universidade de Kiel, por todo apoio concedido durante a elaboração dos modelos hidrológicos deste trabalho.

Aos gerentes das fazendas Santa Maria da Fábrica e Santo Ignácio de Loyola: Demétrio e Pé, respectivamente.

À Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) no âmbito dos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) e do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais (CRHEA).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio à pesquisa concedido (processo FAPESP 2015/03806-1)

Aos meus pais Daniel e Tânia, ao meu irmão Lucas e à minha namorada Munique por sempre estarem ao meu lado durante todo esse processo.

Muito obrigado por tudo!

RESUMO

ALCÂNTARA, G. M. **Modelagem dos impactos hidrológicos decorrentes de alterações do uso e ocupação do solo em bacia hidrográfica rural**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Muitos rios brasileiros ainda não são monitorados. A carência de informações relevantes costuma gerar diversos problemas para a administração pública. Por vezes, essa falta de dados pode ser compensada por meio de modelagem hidrológica, que requer um conhecimento prévio sobre a bacia a ser estudada. Atualmente, a mudança no uso e cobertura do solo em bacias hidrográficas é um dos temas mais abordados nas pesquisas hidrológicas, podendo a avaliação dos impactos causados por essa ser feita através de modelagem hidrológica. O presente trabalho utilizou o *framework* JAMS (*Jena Adaptable Modelling System*) na elaboração de um modelo hidrológico para a bacia do Ribeirão da Onça, a qual está localizada em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani, um dos mais importantes aquíferos transfronteiriços do mundo. A bacia é predominantemente rural, logo, seu uso e ocupação do solo variam ao longo do tempo. Sendo assim, objetivou-se avaliar os efeitos das alterações de uso do solo no regime hidrológico da bacia por meio da elaboração de múltiplos modelos hidrológicos no JAMS/J2K, os quais foram calibrados independentemente (de 2008 a 2015) e validados por um modelo atual (2017), a fim de se gerar uma parametrização capaz de prever os efeitos hidrológicos decorrentes de alterações no uso e ocupação do solo da bacia. Previamente à elaboração dos modelos, procedeu-se à validação dos dados hidrológicos e climatológicos coletados e disponíveis da bacia, por meio da análise das correlações entre as medições dos equipamentos, feita por programa elaborado em Python. Em seguida, elaboraram-se mapas de uso do solo para os anos de 2008, 2011, 2013, 2015 e 2017. Então, os modelos com seus conjuntos de URHs (Unidades de Resposta Hidrológica) específicos foram calibrados, e os parâmetros ótimos encontrados para cada modelo foram aplicados nos demais para identificação de quais poderiam ser os mais representativos. Durante esta etapa, verificou-se que o modelo de 2013 comportava-se anormalmente, devido à estiagem ocorrida em seu período de calibração, o que justificou sua retirada das etapas seguintes. Em seguida, um programa criado em Python permitiu que os arquivos .dat gerados durante a calibração fossem analisados visualmente, por meio de gráficos de dispersão e *plots* violinos, embasando a tomada de decisão relativa à redução da amplitude de variação dos parâmetros para uma posterior busca manual por parâmetros representativos temporalmente. Os parâmetros encontrados produziram modelos com NSE variando de 0,25 a 0,39; PBIAS de -20,98 a -0,74 e R^2 de 0,45 a 0,65, sendo que o modelo de validação (2017) obteve NSE de 0,26; PBIAS de -1,78 e R^2 de 0,45; indicando que a parametrização encontrada, apesar de não conseguir produzir modelos que eficientemente reproduzam os picos no escoamento, é capaz de estimar satisfatoriamente o escoamento de base, mesmo em condições de mudanças de uso e ocupação do solo. Com isso, realizou-se a aplicação do conjunto de parâmetros em cenários hipotéticos de uso e ocupação do solo, que produziu resultados coerentes com o que se espera. Além disso, também se realizou a setorização do modelo, utilizando os dados de vazão de duas calhas Parshall instaladas na bacia. No entanto, não houve êxito na setorização, evidenciado pelos valores de NSE (-35,41 e 88,08), PBIAS (118,63 e 118,81) e R^2 (0,15 e 0,12). O fraco desempenho na setorização pode ser corrigido calibrando-se o modelo espacialmente, em adição à calibração temporal, ou seja, com múltiplos dados de entrada de vazão, localizados em pontos distintos na bacia.

Palavras chave: Modelagem chuva-vazão. Escoamento superficial. Diferentes usos e ocupação do solo. Bacia do Ribeirão da Onça.

ABSTRACT

ALCÂNTARA, G. M. **Modelling the hydrological impacts resulting from land use changes in a rural catchment.** Master of Science thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2018.

Many Brazilian rivers are not monitored. The lack of relevant information may generate multiple problems for public administration. Sometimes this data may be supplied through hydrological modelling, which requires a previous knowledge regarding the watershed that will be studied. Currently, the land use and cover change in watersheds is one of the most researched themes in the hydrological scientific community, with the impacts caused by it being able to be assessed by hydrological modelling. In that sense, this work has used the framework JAMS (Jena Adaptable Modelling System) in the elaboration of a hydrological model for the Ribeirão da Onça catchment, which is located in an outcrop zone of the Guarani Aquifer System, one of the largest transboundary aquifers in the world. The catchment is mainly rural; thus, its land use and occupation vary heavily over time. In this context, the intent of this work was to evaluate the effects of the land use/cover changes in the hydrological processes through the elaboration of multiple J2K/JAMS hydrological models, which were calibrated individually (2008 through 2015) and validated with a recent model (2017), with the goal of creating a model that is able to predict long term hydrological effects of land use/cover changes in the catchment. Before creating the models, a validation of the hydrological and climatic data available in the catchment was done, through the analysis of the correlations between the measures, achieved with the use of a Python software. After that, land use maps were elaborated for the years 2008, 2011, 2013, 2015 and 2017. Then, the models with their HRU (Hydrological Response Units) specific sets were calibrated, then the optimal parameters for each model were applied on the other ones, to assess which were the most representative. During this step, the 2013 model was deemed anomalous, due to the drought that occurred during its calibration period, which justified its removal from the following stages. After that, an application made in Python allowed the .dat files generated during calibration to be visually analysed, through scatter and violin plots, aiding the decisions regarding the new maximum and minimum values for the parameters, preceding a manual search for the globally representative parameters set. The set that was found produced models with NSE varying from 0.25 to 0.39, PBIAS from -20.98 to -0.74 and R^2 from 0.45 to 0.65, being that the validation model (2017) achieved an NSE of 0.26; PBIAS of -1.78 and R^2 of 0.45, meaning that the parameters found, despite not being able to effectively reproduce the runoff peak values, is able to satisfactorily estimate the base runoff, even in land use and cover change conditions. With that, the parameters set found was applied in hypothetical scenarios of land use and cover, which produced coherent results with what was expected. A model sectorization was also attempted, using discharge data from two Parshall flumes installed in the catchment. However, there was no success in the attempt, evidenced by the NSE (-35.41 and 88.08), PBIAS (118.63 and 118.81) and R^2 (0.15 and 0.12) values. The weak performance of the sectorization may be fixed by calibrating the model spatially, in addition to the calibration in regards to time. In other words, with multiple input discharge data, located in distinct points inside the catchment.

Keywords: Hydrological modelling. Runoff. Land use and cover changes. Ribeirão da Onça catchment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>JUICE Builder (JAMS User Interface Component Editor)</i>	32
Figura 2 – Estrutura do modelo J2K no <i>framework</i> JAMS	33
Figura 3 – Subdivisão da BRO em URHs	34
Figura 4 – Localização da bacia do Ribeirão da Onça	37
Figura 5 – (a) Localização dos dados hidrometeorológicos de entrada; (b) Localização dos <i>shapes</i> das URHs; (c) Localização dos <i>shapes</i> dos canais fluviais; (d) Localização dos parâmetros de entrada não calibráveis	39
Figura 6 – Seção de medição de vazão na bacia do Ribeirão da Onça.....	40
Figura 7 – Instrumentação da seção de medição da bacia do Ribeirão da Onça. (a) Medição com molinete; (b) Bateria, controlador de carga e cabo transmissor de dados do ADCP; (c) Bueiros, linígrafo (tubo inferior) e barômetro; (d) Barramento a jusante dos bueiros.....	41
Figura 8 – Comparação das velocidades nos bueiros esquerdo e direito	42
Figura 9 – ADCP Sontek IQ.....	42
Figura 10 – Transdutores de pressão.....	43
Figura 11 – Molinete fluviométrico.....	44
Figura 12 – Planilha orun.dat	45
Figura 13 – Localização das estações meteorológicas da bacia do Ribeirão da Onça	46
Figura 14 – Planilha rain.dat.....	47
Figura 15 – Conceito do módulo solo-água do J2K	56
Figura 16 – Representação do escoamento superficial nas URHs, onde as setas vermelhas indicam a transferência de massa entre URHs adjacentes.....	61
Figura 17 – Mapa geológico da bacia do Ribeirão da Onça.....	64
Figura 18 – Mapa de profundidades do nível freático da bacia do Ribeirão da Onça.....	65
Figura 19 – Usos do solo predominantes na BRO atualmente	66
Figura 20 – Mapas de uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão da Onça para os anos de 2003 (a), 2005 (b), 2008 (c) e 2010 (d) gerados a partir da classificação de imagens Landsat.....	67
Figura 21 – MDE da bacia do Ribeirão da Onça.....	69
Figura 22 – Componente RCRichter	70
Figura 23 – Adição de novos componentes no contexto HRULoop	71
Figura 24 – Alteração da projeção no componente CalcLatLong	71
Figura 25 – Alterações no componente ExtRad	72
Figura 26 – Alterações da localização da área de trabalho e do período de execução.....	73

Figura 27 – Janela de configurações do componente de eficiências do modelo.....	74
Figura 28 – Configuração do otimizador	75
Figura 29 – Localização dos arquivos de parâmetros não calibráveis	76
Figura 30 – Planilha hgeo.par	76
Figura 31 – Planilha soils.par.....	77
Figura 32 – Planilha landuse.par.....	78
Figura 33 – Verificando a tabela de atributos dos arquivos <i>shapefile</i>	79
Figura 34 – Planilha hrus.par	80
Figura 35 – Planilha reach.par	80
Figura 36 – Programa Core Alpha 6 (CA6).....	81
Figura 37 – R^2 em função do tempo e gradiente	82
Figura 38 – Série temporal individual.....	82
Figura 39 – Série temporal comparativa	83
Figura 40 – Gráfico de dispersão	83
Figura 41 – Exemplo de como os arquivos .csv devem estar para serem lidos pelo CA6.....	84
Figura 42 – Goptimal 4 (GO4).....	86
Figura 43 – Precipitação anual medida na estação climatológica do CRHEA	88
Figura 44 – Cenários hipotéticos de uso e ocupação do solo. Cenário 1: Eucalipto; Cenário 2: Solo exposto.....	89
Figura 45 – Localização das calhas Parshall na BRO.....	90
Figura 46 – Mapas de uso e ocupação do solo da bacia do Ribeirão da Onça	92
Figura 47 – Discretização da bacia do Ribeirão da Onça em URHs	94
Figura 48 – Gráfico comparativo das vazões do transdutor de pressão e do molinete	95
Figura 49 – Correção das alturas do linígrafo.....	96
Figura 50 – Gradiente da correlação linear em função do tempo entre o linígrafo e a precipitação do CRHEA. Os períodos de barramento não registrados nas anotações de campo estão indicados nos quadros vermelhos	97
Figura 51 – Gráficos de dispersão dos dados de precipitação do CRHEA em função dos dados da Monte Alegre. a) CRHEA (eixo x) e Monte Alegre (eixo y); b) CRHEA (eixo x) e ANA (eixo y); c) CRHEA (eixo x) e Santo Ignácio (eixo y); d) Monte Alegre (eixo x) e ANA (eixo y); e) Santo Ignácio (eixo x) e ANA (eixo y)	99
Figura 52 – Escoamento superficial observado e simulado para o modelo de 2008	105
Figura 53 – Escoamento superficial observado e simulado para o modelo de 2011	105
Figura 54 – Escoamento superficial observado e simulado para o modelo de 2015	106

Figura 55 – Escoamento superficial observado e simulado para o modelo de 2017 (validação)	106
Figura 56 – Escoamento superficial observado e simulado para o modelo de 2015 com calibração individual.....	108
Figura 57 – Escoamento simulado para o MSE	111
Figura 58 – Escoamento simulado para o MSS.....	111
Figura 59 – Escoamento simulado para o MCE.....	112
Figura 60 – Escoamento simulado para o MCS	112
Figura 61 – URHs para as áreas de drenagem das calhas 1 e 2.....	113
Figura 62 – Escoamento simulado para a calha 1	114
Figura 63 – Escoamento simulado para a calha 2	115
Figura 64 – Velocidades e correlações entre os bueiros.....	131
Figura 65 – Ferramenta de discretização de bacias, HRUweb	133
Figura 66 – Inserção dos arquivos base no HRUweb.....	133
Figura 67 – Localização da bacia no HRUweb	134
Figura 68 – Indicação da quantidade de pixels que compõe a menor sub-bacia.....	134
Figura 69 – Reposicionamento da estação fluviométrica.....	135
Figura 70 – Especificação do número de <i>pixels</i> da menor URH gerada	135
Figura 71 – <i>Download</i> dos resultados	136
Figura 72 – Gráficos de dispersão dos parâmetros calibrados	155
Figura 73 – Gráficos violinos dos parâmetros calibrados	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização fisiográfica da bacia do Ribeirão da Onça	38
Tabela 2 – Localização das estações pluviométricas e meteorológicas	46
Tabela 3 – Pressão de saturação de vapor em função da temperatura do ar.....	48
Tabela 4 – Termos das Equações 23 e 24.....	52
Tabela 5 – Informações sobre os mapas de uso do solo	68
Tabela 6 – Propriedades do algoritmo NSGA-II.....	75
Tabela 7 – Parâmetros de solo	77
Tabela 8 – Resistência superficial ao vapor de água para cada mês do ano juliano	78
Tabela 9 – Períodos de aquecimento e calibração dos modelos.....	85
Tabela 10 – Valores máximos, mínimos e iniciais dos parâmetros calibrados	85
Tabela 11 – Modelos dos cenários hipotéticos	89
Tabela 12 – Evolução do uso do solo na BRO	91
Tabela 13 – Número de URHs por modelo	94
Tabela 14 – Períodos de represamento registrados na seção de medição de vazão da BRO ...	96
Tabela 15 – Comparação dos valores de R^2 e testes p bicaudais entre os equipamentos medidores de vazão em relação à precipitação fornecida pelo CRHEA	97
Tabela 16 – Correlação (R^2) entre os dados de vazão de todos os métodos utilizados na BRO	98
Tabela 17 – Correlação (R^2) entre os dados de precipitação das quatro estações na BRO e localização dos gráficos de dispersão	98
Tabela 18 – Coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe para os melhores conjuntos de parâmetros de cada modelo e como os modelos dos demais anos respondem a esses conjuntos	101
Tabela 19 – Valores dos parâmetros mais representativos de cada modelo.....	102
Tabela 20 – Novos limites inferiores e superiores e valor final calibrado	103
Tabela 21 – Valores de NSE, PBIAS e R^2 em todos os modelos, utilizando os parâmetros mais representativos	103
Tabela 22 – Comparação entre os parâmetros calibrados manualmente para o modelo de 2015 e os encontrados para representatividade global	109
Tabela 23 – Valores de NSE, PBIAS e R^2 para o modelo de 2015 utilizando os parâmetros calibrados manualmente (locais) e representativos (globais)	109

Tabela 24 – Valores de NSE, PBIAS e R^2 dos modelos de 2008, 2011, 2013 e 2017 utilizando os parâmetros encontrados na calibração individual (local) de 2015.	110
Tabela 25 – Número de URHs geradas para as áreas de drenagem das calhas	113
Tabela 26 – Valores de NSE, PBIAS e R^2 para os modelos setorizados das calhas.....	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ac	Capacidade de ar
ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
AG	Algoritmo Genético
AGMO	Algoritmo Genético Multiobjetivo
ANA	Agência Nacional de Águas
BRO	Bacia do Ribeirão da Onça
CA6	Programa <i>Core Alpha 6</i>
CRHEA	Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
ETP	Evapotranspiração
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
Fc	Capacidade de campo
GO4	Programa <i>Global Optimizer 4</i>
IDW	<i>Inverse Distance Weighted</i>
Inf	Infiltração
Int _{max}	Interceptação máxima
JAMS	<i>Jena Adaptable Modelling System</i>
JUICE	<i>Jams User Interface Component Editor</i>
KDE	<i>Kernel Density Estimation</i>
LAI ou IAF	Índice de área foliar
LHC	Laboratório de Hidráulica Computacional
LPS	Unidade de armazenamento no solo como poros grandes
LUCC	<i>Land Use/Cover Change</i>
MaxInf	Infiltração máxima
MaxLPS	Máximo armazenamento no depósito de poros grandes
MaxMPS	Máximo armazenamento no depósito de poros médios
MaxRG1	Armazenamento máximo de água subterrânea do compartimento RG1
MaxRG2	Armazenamento máximo de água subterrânea do compartimento RG2
MCE	Modelo chuvoso/eucalipto
MCS	Modelo chuvoso/solo exposto
MDE	Modelo digital de elevação
MSE	Modelo seco/eucalipto

MSS	Modelo seco/solo exposto
mAc	Multiplicador da capacidade de ar
mFc	Multiplicador da capacidade de campo
MPS	Unidade de armazenamento no solo com poros médios
NSE	<i>Nash-Sutcliffe Efficiency</i>
NSGA-II	<i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
OEA	Organização dos Estados Americanos
OPTAS	<i>Optimization Assistant</i>
PBIAS	<i>Percent Bias</i>
POO	Programação orientada a objeto
RG1	Compartimento próximo à superfície com zona permeável intemperizada
RG2	Compartimento que representa o aquífero inferior, próximo à rocha mãe
RPS	Rotações por segundo
SAG	Sistema Aquífero Guarani
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
UGHRI	Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
USP	Universidade de São Paulo
UTM	Universal Transversa de Mercator
θ_{LPS}	Saturação relativa do solo de poros grandes
θ_{MPS}	Saturação relativa do solo de poros médios
θ_{Soil}	Saturação do solo

LISTA DE SÍMBOLOS

'	Minutos
“	Segundos
A	Área da seção transversal drenada
AQ	Neossolo Quartzarênico
a_h	Coeficiente linear
a_{hum}	Umidade absoluta
b_h	Coeficiente angular
C	Constante universal dos gases
c_p	Capacidade de calor específico do ar para pressão constante
D	Diâmetro
Dist	Distância de uma estação para a URH mais próxima
DP	Dados interpolados
DW	Dado regionalizado das estações
e	Pressão de vapor
e_s	Pressão de saturação do vapor
g	Aceleração da gravidade
G	Fluxo de calor no solo
H	Altura
I	Declividade do leito do rio
ID	Identificação
inter	Interceptação
K	Kelvin
km	Quilômetro
L	Calor latente de evaporação
L_{est}	Coordenada UTM leste de uma estação
L_{URH}	Coordenada UTM leste de uma URH
m	Metro
M	Fator de rugosidade de Manning
N_{est}	Coordenada UTM norte de uma estação
N_{URH}	Coordenada UTM norte de uma URH
°	Graus
°C	Graus Celsius

p	Pressão do ar
p_0	Pressão do ar ao nível do mar
P	Densidade do ar
Pa	Pascal
$perc$	Percolação
P_{ws}	Pressão de saturação de vapor
Q	Vazão ou escoamento
r	Coefficiente de correlação
R^2	Coefficiente de determinação
r_a	Resistência aerodinâmica da cobertura vegetal
rh_{um}	Umidade relativa
R_0	Radiação extraterrestre
R_G	Radiação global
R_h	Raio hidráulico
R_L	Radiação efetiva de ondas longas
RL	Regressão linear entre os valores diários das estações
R_k	Coefficiente de retenção do escoamento
R_N	Balanco de radiação solar
r_s	Resistência superficial da cobertura do solo
s	Declividade da curva de vapor de pressão
$soil_{sat}$	Saturação do solo
S_0	Duração da insolação possível
T	Temperatura
TA	Coefficiente de roteamento
V	Velocidade
W	Peso da estação
$wDist$	Distância ponderada
α	Capacidade de armazenamento da área foliar por metro quadrado
γ	Constante psicrométrica
ζ	Ângulo de incidência do sol
φ	Latitude

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Hipóteses.....	26
1.2	Objetivos.....	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	Modelos hidrológicos chuva-vazão	27
2.1.2	Período de aquecimento.....	28
2.1.3	Calibração e validação.....	28
2.1.3.1	<i>Coeficiente de Nash-Sutcliffe</i>	29
2.1.3.2	<i>Porcentagem de viés</i>	30
2.1.3.3	<i>Coeficiente de determinação</i>	30
2.1.3.4	<i>NSGA-II</i>	30
2.2	<i>Framework JAMS</i>	31
2.3	Modelo JAMS/J2K	32
2.3.1	Conceito de distribuição	33
2.4	Mudanças de uso e cobertura do solo	34
2.5	Sistema Aquífero Guarani	35
3	MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1	Área de estudo.....	37
3.2	Dados de entrada do modelo	38
3.2.1	Dados hidrológicos	39
3.2.1.1	<i>Razão da velocidade entre os bueiros</i>	41
3.2.1.2	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>	42
3.2.1.3	<i>Transdutores de pressão</i>	43
3.2.1.4	<i>Molinete fluviométrico</i>	43
3.2.2	Dados meteorológicos	45
3.2.2.1	<i>Estações meteorológicas</i>	45
3.2.2.2	<i>Precipitação</i>	46
3.2.2.3	<i>Temperatura, insolação, umidades relativa e absoluta e velocidade do vento</i>	47
3.3	Descrição do modelo J2K/JAMS.....	48
3.3.1	Parâmetros hidrogeológicos atemporais	48
3.3.2	Regionalização dos dados climáticos	49

3.3.3	Cálculo da evapotranspiração	51
3.3.4	Módulo de interceptação	55
3.3.5	Módulo solo-água	56
3.3.6	Módulo de águas subterrâneas	59
3.3.7	Módulo de roteamento lateral	61
3.3.8	Módulo de roteamento fluvial.....	62
3.4	Elaboração do modelo	63
3.4.1	Unidades de resposta hidrológica	63
3.4.1.1	<i>Geologia</i>	63
3.4.1.2	<i>Tipos de solo</i>	64
3.4.1.3	<i>Uso e ocupação do solo</i>	65
3.4.1.4	<i>Modelo digital de elevação</i>	68
3.4.2	Adaptação do modelo J2K	69
3.4.3	Configuração do módulo de otimização OPTAS.....	73
3.4.4	Parametrização do modelo	75
3.4.4.1	<i>Parâmetros hidrogeológicos</i>	76
3.4.4.2	<i>Parâmetros do solo</i>	76
3.4.4.3	<i>Parâmetros de uso do solo e cobertura vegetal</i>	77
3.4.4.4	<i>Parâmetros das URHs e canais fluviais</i>	78
3.5	Adequação dos dados de vazão e climatológicos	80
3.6	Calibração.....	84
3.7	Otimização global.....	86
3.8	Validação.....	87
3.9	Aplicação do modelo	88
3.9.1	Cenários hipotéticos	88
3.9.2	Setorização do modelo	90
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	91
4.1	Mapas de uso e ocupação do solo.....	91
4.2	Unidades de resposta hidrológica (URHs)	93
4.3	Adequação dos dados de entrada	94
4.4	Calibração e validação	100
4.5	Escoamento simulado	104
4.6	Calibração local.....	107
4.7	Cenários hipotéticos	110

4.8	Setorização do modelo.....	113
5	CONCLUSÃO.....	117
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
	APÊNDICE A – Velocidades e correlações entre os bueiros.....	131
	APÊNDICE B – Discretização da bacia em URHs.....	133
	APÊNDICE C – Código em Python que permite analisar a correlação entre os dados hidrológicos e climáticos da bacia	137
	APÊNDICE D – Código em Python que permite visualizar a distribuição dos parâmetros dos modelos após múltiplas calibrações.....	149
	APÊNDICE E – Gráficos de dispersão dos parâmetros calibrados	155
	APÊNDICE F – Gráficos violinos dos parâmetros calibrados.....	157

1 INTRODUÇÃO

Modelos hidrológicos chuva-vazão conceituais, baseados em processos físicos e com discretização espacial distribuída, têm se tornado populares no gerenciamento de recursos hídricos. Esses modelos são usados para simular uma variedade de aspectos complexos, utilizando parâmetros que variam no espaço e no tempo. Segundo Lenhart et al. (2002), devido à variabilidade espacial dos parâmetros de entrada dos modelos, bem como o difícil acesso para medição dos mesmos, é necessário considerar as incertezas como parte inerente ao processo de construção de um modelo. Logo, deve-se dar importância à calibração do modelo selecionado.

Turner et al. (2007) consideram a mudança no uso e cobertura do solo como um dos principais componentes das alterações climáticas globais. Consequentemente, a avaliação dos impactos causados por essas mudanças tornou-se o cerne das pesquisas em hidrologia no século atual (DEFRIES; ESHLEMAN, 2004; STONESTROM et al., 2009). Tipicamente, os impactos que essas mudanças causam nos recursos hídricos são analisados por meio de modelagem hidrológica (HUISMAN et al., 2009).

Nesse contexto, para o presente trabalho optou-se pela utilização do sistema de modelagem J2K/JAMS (*Jena Adaptable Modelling System*), devido à sua flexibilidade (KRALISCH; KRAUSE, 2006). Esta característica é conferida por seu sistema modular, o qual permite que um único modelo possa ser aplicado para múltiplos problemas através da mudança de componentes ou implementação de novos. Adicionalmente, o J2K faz uso de quatro componentes bastante relevantes para a bacia a ser estudada: escoamento superficial, interfluxo do solo, interfluxo da camada intemperizada da unidade hidrogeológica subjacente e escoamento de base.

A bacia do Ribeirão da Onça (BRO), objeto de estudo do presente trabalho, pertence à zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG), um dos mais importantes aquíferos transfronteiriços do mundo. A bacia está localizada a cerca de 1,5 km do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais (CRHEA), onde uma série de dados climatológicos relevantes para o trabalho são coletados continuamente (WENDLAND et al., 2007). Na bacia há uma estação pluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA) e uma estação meteorológica do grupo de pesquisas do Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC). Além disso, a bacia possui uma estação fluviométrica localizada próxima ao exutório, com equipamentos de monitoramento contínuo e medições quinzenais com molinete hidrométrico (MALDONADO, 2009).

Machado et al. (2016) elaboraram um modelo chuva-vazão para a bacia do Ribeirão

da Onça utilizando o sistema de modelagem JAMS/J2K, com a finalidade de reconstituir a série histórica de vazão e preencher falhas do monitoramento do escoamento superficial, e observaram a possibilidade de se avaliar o efeito das alterações de uso e ocupação do solo no regime hidrológico da bacia. Dada a predominância rural na Bacia do Ribeirão da Onça e o histórico de mudanças de uso e cobertura do solo dentro de seu perímetro, a mesma apresentou-se como área de estudo adequada para avaliar a capacidade do modelo JAMS/J2K em representar e prever os efeitos hidrológicos dessas mudanças.

Portanto, verificou-se a necessidade de revalidar os dados hidrológicos já existentes originados dos sistemas de monitoramento da bacia e utilizá-los para a construção de um novo modelo chuva-vazão, bem como de elaborar novos mapas de uso e ocupação do solo para se atualizar a série histórica da bacia.

1.1 Hipóteses

Esta dissertação trabalha com as seguintes hipóteses: (i) o regime hidrológico de bacias hidrográficas rurais pode ser alterado significativamente em decorrência de mudanças no uso do solo e da cobertura vegetal; (ii) é possível estimar esses efeitos por meio de modelagem hidrológica; (iii) a criação de um modelo hidrológico representativo para uma bacia hidrográfica em constante mudança de seu uso e ocupação do solo depende da análise temporal dessas mudanças.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo elaborar modelo chuva-vazão capaz de simular os efeitos das alterações do uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão da Onça em seu regime hidrológico. Para tanto, as seguintes metas foram traçadas:

- (i) Revalidar dados hidrológicos e climatológicos coletados e disponíveis da bacia do Ribeirão da Onça;
- (ii) Preencher e atualizar série histórica de mapas de uso e ocupação do solo;
- (iii) Elaborar e calibrar múltiplos modelos hidrológicos de maneira independente;
- (iv) Promover uma calibração representativa dos modelos para obter um único conjunto de parâmetros;
- (v) Aplicar o modelo otimizado em cenários de mudanças de uso do solo e de setorização da área de drenagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Modelos hidrológicos chuva-vazão

Segundo Tucci (1998), modelos hidrológicos são ferramentas utilizadas para representar os fenômenos que ocorrem em uma bacia hidrográfica e predizer suas consequências em relação ao que foi observado. Em geral, as informações disponíveis são inconsistentes, e a ausência de dados observados consolida a modelagem hidrológica como essencial no gerenciamento de recursos hídricos, em especial para bacias hidrográficas não monitoradas ou com escassez de dados, que podem ter séries sintéticas geradas a partir da calibração de um modelo com base em um conjunto limitado de dados (DOS SANTOS, 2009).

O método mais comum para determinação dos parâmetros otimizados de um modelo é a calibração por dados históricos. Funções objetivo como a Porcentagem de Viés (PBIAS), o Coeficiente de Determinação (R^2) e o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) são rotineiramente usadas para minimizar a diferença entre o escoamento observado e simulado (SOROOSHIAN, 1991; GAN; BIFTU, 1996; GUPTA et al., 1998; GUPTA et al., 2009). Adicionalmente, a validação é a prática padrão em modelagem hidrológica para se testar o desempenho de um modelo (ANDRÉASSIAN et al., 2009).

2.1.1 Modelos hidrológicos conceituais

Este tipo de modelo descreve todos os processos hidrológicos que compõem uma bacia hidrográfica através de parâmetros. O mesmo consiste em uma série de reservatórios interligados que representam elementos físicos em uma bacia hidrográfica, sendo eles recarregados pela precipitação, infiltração e percolação, e esvaziados pela evaporação, escoamento, drenagem, entre outros (DEVI et al., 2015). Uma característica chave dessa classe de modelo diz respeito ao fato de seus parâmetros calibráveis não poderem ser diretamente mensurados, mas terem que ser inferidos a partir dos dados observados (BEVEN; BINLEY, 1992).

2.1.2 Condições iniciais do modelo

Um ponto essencial na modelagem hidrológica é a especificação das condições iniciais da bacia hidrográfica analisada, tendo em vista que estas causam um grande impacto na

estabilidade e convergência do modelo (BERTHET et al., 2009). Essa particularidade, ao contrário do que é preconizado, não tem sido apropriadamente avaliada pela comunidade científica voltada à modelagem hidrológica (CLOKE et al., 2003). Os dois fatores de entrada que mais afetam a resposta de um modelo hidrológico são a precipitação e a umidade do solo. A primeira é uma variável forçante e a segunda é uma variável de estado. Porém, ambas possuem variabilidade no tempo e no espaço, o que torna a relação entre chuva e escoamento não-linear, logo, é essencial que o escoamento seja representado por dados confiáveis (KIM et al., 2017). Existem estudos acerca da sensibilidade do escoamento simulado à variabilidade da precipitação e sobre o efeito das condições iniciais na saída de modelos hidrológicos (GOODRICH et al., BELL; MOORE, 2000; SENARATH et al., 2000; CASTILLO et al., 2003; VIVONI et al., 2006; SEGOND et al., 2007; NICÓTINA et al., 2008; SANGATI; BORGA, 2009; NIKOLOPOULOS et al., 2011; ZHANG et al., 2011). Os estudos citados anteriormente exploraram as interações complexas entre a umidade inicial do solo, as condições climáticas e as condições da bacia hidrográfica.

2.1.2 Período de aquecimento

O período de aquecimento de um modelo é um processo de ajuste que permite que o modelo atinja um estado otimizado, durante o qual a água armazenada internamente (indicada, por exemplo, pela variável umidade do solo) desloca-se da condição inicial para um estado ótimo. Ao atingir o estado ótimo, a resposta do modelo se torna realista (ou estável), e as variáveis hidrológicas simuladas correspondem melhor às observadas (YANG et al., 1995; COSGROVE et al., 2003; AJAMI et al., 2014; SECK et al., 2015). O comportamento do período de aquecimento em modelos hidrológicos ainda não foi completamente explorado, e não há consenso na literatura sobre diversas questões, incluindo a definição de um estado de equilíbrio, os critérios de avaliação do período de aquecimento e um método definitivo de aquecimento (YANG et al., 1995; SRESTHA; HOUSER, 2010).

2.1.3 Calibração e validação

A calibração de modelos hidrológicos, processo que identifica quais parâmetros geram a resposta hidrológica simulada que melhor corresponde à observada, é um componente crítico no desenvolvimento de modelos, visto que usualmente não há como se inferir tais parâmetros diretamente a partir de medições realizadas na bacia hidrográfica (BEVEN, 2011). Este

processo pode ser dividido em três etapas, iterativas: em primeiro lugar, os parâmetros devem ser especificados, baseando-se no conhecimento prévio sobre a área de estudo ou em estimativas; a segunda etapa consiste em executar o modelo e verificar o desempenho por meio dos testes estatísticos, os quais atuarão como a função objetivo, que deve ser maximizada ou minimizada; e, por último, caso o desempenho não esteja adequado, os parâmetros devem ser alterados previamente a uma nova execução do processo (SOROOSHIAN; GUPTA, 1995). A calibração pode ser feita manualmente ou automaticamente, caso o programa de modelagem hidrológica forneça tal funcionalidade.

Um modelo calibrado, contudo, permanece como uma simplificação de um sistema físico complexo (BEVEN, 2010). Portanto, antes de se aplicar um modelo hidrológico, é necessário que o mesmo seja validado para se compreender a variação espacial e temporal de seu desempenho (MCMILLAN et al., 2016). O desempenho de modelos hidrológicos não pode ser descrito completamente por um único critério, logo, uma variedade de testes estatísticos deve ser usada para se quantificar diferentes aspectos do comportamento e acurácia do modelo (GUPTA et al., 2008). Um dos métodos de validação mais utilizados é o teste com amostras repartidas (*split-sample test*), o qual consiste em dividir a execução do modelo temporalmente, em que há um período de calibração e um de validação, sequencialmente (KLEMES, 1986).

Moriasi et al. (2008) recomendam o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe, a porcentagem de viés e o coeficiente de determinação como os testes estatísticos mais adequados para calibrar e validar modelos hidrológicos. Os pesquisadores afirmam ainda que uma simulação é considerada satisfatória quando $NSE > 0,25$; $PBIAS = \pm 25$ e $R^2 > 0,5$.

2.1.3.1 Coeficiente de Nash-Sutcliffe

O NSE (Equação 1) foi desenvolvido por Nash e Sutcliffe na década de 70 e representa a razão entre a variância residual (“ruído”) quando comparada à variância dos dados observados (“informação”), variando entre $-\infty$ e 1, sendo que 1 representa uma adequação perfeita do modelo ao fenômeno observado (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

$$NSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}_i)^2} \right] \quad (1)$$

Em que: Y_i^{obs} representa o dado observado, Y_i^{sim} o dado simulado e $\bar{Y}_i$ a média dos dados observados.

2.1.3.2 Porcentagem de viés

A PBIAS (Equação 2), de acordo com Gupta et al. (1999), determina a tendência média dos dados observados estarem super (valor positivo) ou subestimados (valor negativo).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (2)$$

Em que: Y_i^{obs} representa o dado observado e Y_i^{sim} o dado simulado.

2.1.3.3 Coeficiente de determinação

O coeficiente de determinação R^2 (Equação 3) descreve o grau de colinearidade entre dados simulados e observados, em outras palavras, a proporção da variância dos dados observados em relação ao modelo. R^2 varia de 0 a 1, com valores próximos a 1 indicando menor desvio na variância (MORIASI et al., 2008).

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \overline{Y^{obs}})(Y_i^{sim} - \overline{Y^{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \overline{Y^{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - \overline{Y^{sim}})^2}} \right)^2 \quad (3)$$

2.1.3.4 NSGA-II

Algoritmos genéticos (AGs) são capazes de resolver problemas de otimização não-lineares eficientemente, e têm sido utilizados para uma variedade de desafios relacionados aos recursos hídricos (ERCAN; GOODALL, 2013). Algoritmos genéticos usam os princípios da genética e seleção natural para otimização, sendo uma boa opção para modelos hidrológicos, os quais não podem ser calibrados adequadamente por algoritmos de calibração baseados em gradientes (HAUPT; HAUPT, 2004). A função objetivo para cada solução em um AG pode ser avaliada através de computação paralela, o que fornece uma vantagem computacional (ZHANG et al., 2013). O procedimento de busca heurística dos AGs, acoplado às regras de busca estocástica, aumenta as probabilidades de que sejam encontradas soluções não-únicas (ERCAN; GOODALL, 2016). Estudos demonstraram que essas propriedades dos AGs permitem que converjam a soluções ótimas para uma variedade de problemas, incluindo a

calibração de modelos hidrológicos de bacias hidrográficas (NICKLOW; MULETA, 2001; WINSTON et al., 2003; ARABI et al., 2006).

Algoritmos de calibração multiobjetivo têm melhorado o desempenho de modelos hidrológicos (ANDERSEN et al., 2001). Há uma classe de rotinas de calibração que combinam os benefícios da abordagem de calibração multiobjetivo com algoritmos genéticos: os chamados algoritmos genéticos multiobjetivo (AGMOs). Um dos AGMOs mais populares é o *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II), o qual é um algoritmo de otimização baseado em populações, rápido e eficiente. Além disso, esse AGMO apresenta a vantagem de poder ser paralelizado, e tem se mostrado superior a outros AGMOs (DEB et al., 2002; TANG et al., 2006).

2.2 Framework JAMS

O *framework* JAMS (*Jena Adaptable Modelling System*), desenvolvido na *Friedrich-Schiller-Universität Jena*, é um sistema modular e estruturado de modelagem que foi desenvolvido para atender às metas atuais de gerenciamento sustentável de recursos hídricos (FISCHER et al., 2009). O conceito de *framework* sustenta-se na programação orientada a objeto (POO), que permite que os processos dentro de um modelo sejam divididos, facilitando aos usuários o manejo dos diversos componentes e parâmetros presentes (KRAFT et al., 2011). Kralisch et al. (2007) destacam alguns dos componentes de simulação que foram acrescentados ao JAMS, de modo que o sistema pudesse cobrir vários aspectos relativos à gestão das bacias hidrográficas, em particular no que concerne à modelagem hidrológica, modelagem de nutrientes, otimização de parâmetros e visualização de resultados de modelos.

Os modelos do JAMS são gerados por meio de arquivos de extensão XML, que contêm os módulos dos processos hidrológicos e uma descrição de como esses se relacionam. A interface gráfica *JUICE Builder* (*JAMS User Interface Component Editor*) providencia os elementos para criação dos documentos XML (Figura 1).

Figura 1 – JUICE Builder (JAMS User Interface Component Editor)

Fonte: Autor.

2.3 Modelo JAMS/J2K

O modelo J2K teve seu desenvolvimento iniciado antes do *framework* JAMS, em 1997, e foi criado como um modelo hidrológico orientado a processos para grandes bacias (KRAUSE; KRALISCH, 2005). O J2K não deve ser interpretado como “um novo modelo”, visto que o mesmo foi desenvolvido como um sistema de modelagem aberto. Além disso, a abordagem modular e orientada a objeto torna o sistema apto a receber melhorias sem que para tanto seja necessário criar um modelo novo. O modelo pode ser adquirido gratuitamente no site da Universidade de Jena (<http://jams.uni-jena.de>) e possui extensa documentação. Diversos pesquisadores têm aplicado o modelo J2K em estudos hidrológicos com bacias de características distintas (STEUDEL et al., 2013; KNOCHÉ et al., 2014; RÖDIGER et al., 2014; HELMSCHROT et al., 2014; NEPAL, 2016; ADAMOVIC et al., 2016)

A Figura 2 ilustra a estrutura e fluxograma do modelo J2K implementado no *framework* JAMS.

Figura 2 – Estrutura do modelo J2K no *framework* JAMS

Fonte: Machado et al. (2017).

2.3.1 Conceito de distribuição

O conceito de distribuição do modelo é composto por três níveis de agregação distintos, sendo eles: distribuição espacial e temporal dos dados climáticos de entrada; geração dos processos de escoamento superficial e escoamento superficial concentrado; e roteamento de excessos de escoamento. O nível mais importante de agregação é a subdivisão da área de drenagem em unidades de resposta hidrológica (URHs), que segue a delimitação fisiográfica introduzida por Flügel (1995). As URHs são criadas por meio da técnica de sobreposição de camadas em uma ferramenta de geoprocessamento, sendo essas as camadas: Modelo Digital de Elevação (MDE), declividade, aspecto, uso do solo, tipo de solo, unidades hidrogeológicas e sub-bacias, que produz um único mosaico onde cada unidade representa regiões com conjunto de dados similares (Figura 3). Dooge (1986) sugeriu que uma busca por princípios hidrológicos unificadores que independam de escala, para resolver problemas complexos de variabilidade

espacial, agregação e escalonamento, permite a criação de uma representação mais realista de superfícies de drenagem.

Figura 3 – Subdivisão da BRO em URHs

Fonte: Autor.

2.4 Mudanças de uso e cobertura do solo

As alterações em larga escala do uso do solo e da cobertura vegetal (*land use/cover change* – LUCC) têm-se intensificado no último século devido principalmente a atividades antropogênicas como a expansão agrícola e urbana (MEYER; TURNER, 1992; RAMANKUTTY et al., 2006). LUCC pode afetar processos hidrológicos como a evapotranspiração, interceptação, infiltração e escoamento superficial ao alterar diretamente as condições morfológicas e fisiológicas da paisagem, e ao indiretamente modificar o solo e a atmosfera (MOLINA-NAVARRO et al., 2014; CUO, 2016). A avaliação dos impactos ocasionados por LUCC tem tido considerável atenção na comunidade científica e nos meios políticos no contexto do aumento da escassez hídrica (WANG et al., 2013; GAO et al., 2016; WAGNER et al., 2017).

Atualmente, os impactos da expansão agrícola e urbana ocorrem em todas as escalas, desde locais até globais. No Sudeste do Brasil isso também é válido, onde processos LUCC de degradação/conversão têm ocorrido com maior frequência no último século. Nessa região, particularmente, processos LUCC têm-se acelerado desde a década de 50 com a expansão do agronegócio, seguido pela “Revolução Verde”; e com o fortalecimento da silvicultura no final da década de 60, consolidada entre os anos de 1980 e 2000 (EGLER, 2001; OVERBECK et al., 2007; DE MORAES GONÇALVES et al., 2013).

2.5 Sistema Aquífero Guarani

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é uma das unidades hidroestratigráficas mais importantes da porção Sul da América do Sul. Atualmente a exploração de recursos do aquífero excede $1 \text{ km}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$, estando 93,6% dessa exploração no Brasil (80% destes no estado de São Paulo), 2,8% no Uruguai, 2,3% no Paraguai e 1,3% na Argentina (SINDICO et al., 2017). Cerca de 80% do total é usado no abastecimento público, 15% em processos industriais e 5% em spas geotérmicos (FOSTER et al., 2009).

O SAG é composto por uma sequência de camadas arenosas da era Triássica-Jurássica, com uma espessura média de 250 m (variando de 50 a 600 m), depositados em ambientes continentais, eólicos, fluviais e lacustres, acima de uma superfície de erosão (datando a 250 milhões de anos) e abaixo de uma camada extensa de basalto cretáceo (datando de 30 a 145 milhões de anos) nas bacias do Paraná (Brasil e Paraguai), Chaco-Paraná (Argentina) e do Norte (Uruguai). O Aquífero é formado por um conjunto de formações geológicas hidráulicamente conectadas, sendo no Brasil representadas por: Pirambóia, Botucatu, Santa Maria e Caturrita (SINDICO et al., 2017).

Desde 2004, o grupo de pesquisa do LHC da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) realiza estudos referentes à recarga hídrica do Aquífero Guarani na bacia do Ribeirão da Onça (BARRETO, 2006). Acerca disso, o grupo tem observado que as estimativas de recarga são limitadas pelos dados de escoamento superficial (BARRETO, 2006; GOMES, 2008; MALDONADO, 2009; MEIRA NETO et al., 2011; MACHADO, 2012), evidenciando a importância de se estudar essa componente do balanço hídrico.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A bacia do Ribeirão da Onça (Figura 4) faz parte da Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Tietê/Jacaré (UGHRI 13) e está localizada no município de Brotas, região central do estado de São Paulo, entre os paralelos 22°09' e 22°15' (latitude Sul) e os meridianos 47°55' e 48°00' (longitude Oeste). A bacia possui área de 65 km² e é majoritariamente rural. De acordo com os dados de temperatura do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais (CRHEA), a temperatura média anual da região é de 20,5 °C, e, pela classificação climática de Köppen, a bacia possui clima subtropical úmido com verão chuvoso e inverno seco (PEEL et al., 2007).

Figura 4 – Localização da bacia do Ribeirão da Onça

Fonte: Autor.

A bacia encontra-se na zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani, o qual, de acordo com a Organização dos Estados Americanos (OEA, 2009), abrange os territórios do Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai com seus 1,2 milhão de quilômetros quadrados. Sua importância se deve pelo fato de ser potencial fonte de água potável para 20 milhões de pessoas que vivem em sua área de influência, além de servir como insumo em indústrias e sistemas agrícolas (GÓMEZ et al., 2010). Uma caracterização física da bacia foi promovida por Mattos

et al. (1984) e Preto Filho (1990) apud Pompêo (1990) em mapas de escala 1:10.000, resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização fisiográfica da bacia do Ribeirão da Onça		
Características	Unidade	Valor
Área de drenagem	km ²	65
Perímetro	km	42
Comprimento axial	km	11
Extensão do curso d'água principal	km	16
Comprimento total dos cursos d'água	km	55
Altitude máxima	m	840
Altitude mínima	m	640
Declividade média	m.km ⁻¹	7,6

Fonte: Pompêo (1990).

3.2 Dados de entrada do modelo

O modelo J2K/JAMS necessita que os dados hidrometeorológicos de entrada estejam organizados em arquivos de extensão .dat e salvos em pasta específica (Figura 5a), os *shapes* das URHs e dos canais fluviais também devem estar localizados em pastas específicas (Figura 5b e Figura 5c) apresentando a mesma projeção geográfica, enquanto os parâmetros de entrada não calibráveis devem estar salvos em formato .par (Figura 5d).

Figura 5 – (a) Localização dos dados hidrometeorológicos de entrada; (b) Localização dos *shapes* das URHs; (c) Localização dos *shapes* dos canais fluviais; (d) Localização dos parâmetros de entrada não calibráveis

Mestrado > Modelo definitivo > Modelos_Pos_Corr_Solo > Modelo 2017_30m > input > local >

Name	Date modified	Type	Size
dump	4/6/2018 11:15 PM	File folder	
gis	4/7/2018 12:38 AM	File folder	
ahum	4/2/2018 4:57 PM	DAT File	161 KB
orun	4/4/2018 5:17 PM	DAT File	152 KB
rain	3/24/2018 7:43 PM	DAT File	140 KB
rcorr2	4/13/2017 2:02 PM	DAT File	158 KB
rhum	4/2/2018 4:53 PM	DAT File	151 KB
sunh	4/2/2018 4:23 PM	DAT File	151 KB
tmax	4/2/2018 4:40 PM	DAT File	153 KB
tmean	4/2/2018 4:43 PM	DAT File	155 KB
tmin	4/2/2018 4:45 PM	DAT File	152 KB
wind	2/27/2018 10:31 AM	DAT File	154 KB

a)

Mestrado > Modelo definitivo > Modelos_Pos_Corr_Solo > Modelo 2017_30m > input > local > gis > hrus >

Name	Date modified	Type	Size
Backup	4/7/2018 12:37 AM	File folder	
hrus.dbf	4/2/2018 9:35 PM	DBF File	240 KB
hrus.prj	3/23/2018 7:38 PM	PRJ File	1 KB
hrus.shp	4/2/2018 9:35 PM	SHP File	664 KB
hrus.shx	4/2/2018 9:35 PM	SHX File	10 KB

b)

Mestrado > Modelo definitivo > Modelos_Pos_Corr_Solo > Modelo 2017_30m > input > local > gis > streams >

Name	Date modified	Type	Size
Backup	4/7/2018 12:38 AM	File folder	
streams.dbf	3/23/2018 7:24 PM	DBF File	6 KB
streams.prj	3/15/2018 6:03 PM	PRJ File	1 KB
streams.sbn	4/25/2018 12:21 PM	SBN File	4 KB
streams.sbx	4/25/2018 12:21 PM	SBX File	1 KB
streams.shp	3/23/2018 7:24 PM	SHP File	50 KB
streams.shx	3/23/2018 7:24 PM	SHX File	3 KB

c)

Mestrado > Modelo definitivo > Modelos_Pos_Corr_Solo > Modelo 2017_30m > parameter >

Name	Date modified	Type	Size
backup	7/24/2018 3:10 PM	File folder	
hgeo	3/24/2018 6:07 PM	PAR File	1 KB
hrus	3/23/2018 4:21 PM	PAR File	75 KB
landuse	3/21/2018 2:54 PM	PAR File	2 KB
landuse_right	4/18/2018 10:20 AM	PAR File	2 KB
reach	3/15/2018 5:18 PM	PAR File	2 KB
soils	3/20/2018 10:54 AM	PAR File	42 KB

d)

Fonte: Autor.

3.2.1 Dados hidrológicos

O monitoramento de vazões da bacia do Ribeirão da Onça é realizado em estação

fluviométrica (Figura 6) localizada próxima ao exutório. Maldonado (2009) analisou as técnicas de medição utilizadas na seção e percebeu a viabilidade de utilização das mesmas, porém, como a seção de medição possui leito móvel, não há como definir uma curva-chave para a mesma; sendo assim, o pesquisador propôs o uso da equação de Henderson (1966) para determinar a vazão em um canal circular (Equações 4 e 5). Para tanto, a área de monitoramento conta também com dois bueiros a jusante da seção de medição (Figura 7c), com um transdutor de pressão posicionado próximo a um dos bueiros, que mede uma altura correspondente à da lâmina d'água dentro do bueiro.

$$Q = 1,503.H^{1,9}.D^{0,6} [m^3.s^{-1}] \quad (4)$$

$$Q = 1,378.H^{1,5}.D [m^3.s^{-1}] \quad (5)$$

Quando a relação H/D for menor do que 0,8, utiliza-se a Equação 4, e caso a razão esteja entre 0,8 e 1,2, utiliza-se a Equação 5; nas quais Q corresponde à vazão ($m^3.s^{-1}$), H ao valor da carga hidráulica sobre a geratriz inferior do bueiro (m) e D seu diâmetro (m).

Figura 6 – Seção de medição de vazão na bacia do Ribeirão da Onça

Fonte: Autor.

Além dessa técnica para medir a vazão nesta seção da bacia, realizam-se também medições quinzenais com molinete fluviométrico (Figura 7a) e coletas de dados do ADCP

(*Acoustic Doppler Current Profiler*) modelo Sontek IQ (Figura 7b), que mede a vazão em um dos bueiros a cada 15 minutos.

A estação fluviométrica está localizada dentro de propriedade rural, que possui estação de bombeamento imediatamente a jusante dos bueiros. Para que haja nível suficiente de bombeamento durante o inverno, uma barragem foi instalada pelos gerentes da propriedade (Figura 7d), a qual cria um remanso durante a estiagem. Esse remanso prejudica o uso da equação de Henderson para o cálculo da vazão, devendo ser identificados os períodos em que ocorre.

Figura 7 – Instrumentação da seção de medição da bacia do Ribeirão da Onça. (a) Medição com molinete; (b) Bateria, controlador de carga e cabo transmissor de dados do ADCP; (c) Bueiros, linígrafo (tubo inferior) e barômetro; (d) Barramento a jusante dos bueiros

Fonte: Autor.

3.2.1.1 Razão da velocidade entre os bueiros

Tendo em vista o ADCP e o transdutor de pressão realizam a medição em apenas um dos bueiros, é necessário avaliar se não há uma diferença significativa as vazões que escoam por eles. Para tanto, de julho de 2015 a novembro de 2016, foram realizadas medições com molinete a jusante dos bueiros para se verificar a razão entre suas velocidades (Figura 8). A Figura 64 no apêndice A contém as medições realizadas no período.

A média das razões foi de 1,01, indicando que os valores de vazão calculados para um bueiro podem ser simplesmente multiplicados por 2 para se obter a vazão total.

Figura 8 – Comparação das velocidades nos bueiros esquerdo e direito

Fonte: Autor.

3.2.1.2 Acoustic Doppler Current Profiler

O ADCP (Figura 9) da estação fluviométrica da bacia do Ribeirão da Onça iniciou sua operação no dia 23 de junho de 2015, e desde então realiza medições de vazão a cada 15 minutos. O aparelho, modelo IQ da marca SonTek, está posicionado na soleira do bueiro esquerdo, onde estão os demais equipamentos (Figura 6). O aparelho funciona pelo princípio de Doppler, estimando a velocidade e a direção das partículas presentes na água com base no tempo que uma onda sonora de alta frequência leva para ser refletida e retornar à fonte emissora (TOGNERI et al., 2017). Tendo em vista que o aparelho requer que a geometria da seção em que está instalado seja indicada, os valores de velocidade pontuais medidos podem ser integrados em função da área para que a vazão seja calculada.

Figura 9 – ADCP Sontek IQ

Fonte: Autor.

3.2.1.3 Transdutores de pressão

A estação fluviométrica conta também com dois transdutores de pressão (Figura 10) localizados a montante dos bueiros, sendo um deles responsável por medir a pressão total da coluna d'água acima da geratriz de um dos bueiros e o outro encarregado de medir a pressão atmosférica. Os valores de pressão fornecidos pelo linígrafo devem ser pós-processados por meio de compensação barométrica, com os dados do *barodiver*, a qual remove a parcela da pressão atmosférica. Ambos são da marca vanEssen, foram instalados e estão em operação desde 11 de outubro de 2008, e realizam medições de pressão a cada 15 minutos.

O linígrafo dispõe de memória interna que consegue armazenar 72 mil medições. A cada quinze dias, os dados do linígrafo são baixados via cabo específico, em formato .dat, que apenas pode ser interpretado pelo *software* Diver Office, distribuído gratuitamente. Os dados do linígrafo, após compensação, são utilizados no cálculo da vazão, através de uma das equações de Henderson (Equação 4 ou 5, dependendo da relação H/D) propostas por Maldonado (2009). Os valores de vazão são então multiplicados por 2 e, em seguida, as médias diárias são obtidas para serem utilizadas no modelo.

Figura 10 – Transdutores de pressão

Fonte: www.vanessen.com.

3.2.1.4 Molinete fluviométrico

Desde fevereiro de 2005 são realizadas medições quinzenais com molinete fluviométrico (Figura 11) a montante dos bueiros, onde um trilho foi instalado para facilitar as medições. A medição ocorre conforme estas etapas:

- A cada 30 centímetros, é medida a altura do nível da água em relação ao leito (a seção possui 3 m);

- Calcula-se 40% da altura para cada medição;
- Posiciona-se o rotor na altura da haste (40%) correspondente ao ponto em que será feita a primeira medição;
- Aciona-se o molinete e o contador (30 s) para obtenção do número de rotações (em triplicatas);
- Repete-se os passos anteriores para todos os pontos da seção;
- Calcula-se as velocidades em cada ponto pelas equações abaixo (MALDONADO et al., 2015):

Se o número de rotações por segundo for menor ou igual a 0,7186, usa-se a Equação 6.

$$V = 0,03765296 + 0,24729695.RPS \quad (6)$$

Se for maior, então aplica-se a Equação 7.

$$V = 0,00549455 + 0,29204954.RPS \quad (7)$$

Em que RPS é o número de rotações por segundo da hélice do molinete.

Figura 11 – Molinete fluviométrico

Fonte: www.d2l.com.br.

Para serem utilizados pelo modelo, os dados de vazão devem estar em arquivo nomeado como orun.dat, seguindo o formato ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Planilha orun.dat

	A	B	C	D	E	F	G
1	#obsRunoff.dat observed Runoff at Ribeirão da Onça						
2	@dataValueAttribs						
3	obsRunoff	0	2000				
4	@dataSetAttribs						
5	missingDataVal	-9999		Valor que indica ausência de dados			
6	dataStart	01.01.2000 07:30		Data de início dos dados			
7	dataEnd	31.12.2017 07:30		Data de término dos dados			
8	tres	d		Resolução temporal			
9	@statAttribVal						
10	name	SMF		Nome da estação			
11	ID	16		ID da estação			
12	elevation	693		Elevação da estação			
13	x	196852		Coordenada UTM x			
14	y	7545373		Coordenada UTM y			
15	dataColumn	1					
16	@dataVal						
17	01.01.2000	7:30	-9999				
18	02.01.2000	7:30	-9999				
19	03.01.2000	7:30	-9999				
20	04.01.2000	7:30	-9999				
21	05.01.2000	7:30	-9999				
22	06.01.2000	7:30	-9999				

Fonte: Autor.

3.2.2 Dados meteorológicos

3.2.2.1 Estações meteorológicas

Os dados meteorológicos diários (precipitação, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e insolação) foram obtidos no CRHEA. Além desses dados, também foram utilizados os dados de precipitação do pluviômetro da Agência Nacional de Águas (ANA), das estações meteorológicas Monte Alegre e Santo Ignácio, e do pluviômetro P01, instalados pelo LHC. A Tabela 2 apresenta as coordenadas geográficas das estações e o período dos dados utilizados no modelo. A Figura 13 ilustra as posições das estações na bacia.

Tabela 2 – Localização das estações pluviométricas e meteorológicas

Estação	CRHEA	ANA	Monte Alegre e P01	Santo Ignácio
Altitude	733	747	752	832
Longitude (S)	22°10'13"	22°14'27"	22°11'19"	22°13'25"
Longitude (O)	47°53'55"	47°56'16"	47°57'12"	47°56'16"
Início dos dados	01/01/2000	01/01/2000	01/01/2005	28/04/2010
Término dos dados	31/12/2017	31/12/2017	31/12/2017	09/02/2011

Fonte: Autor.

Figura 13 – Localização das estações meteorológicas da bacia do Ribeirão da Onça

Fonte: Autor.

3.2.2.2 Precipitação

A precipitação é um dos principais dados de entrada do modelo, e, nesse caso, o único dado climático que precisou ser regionalizado durante o processamento, visto que os dados de chuva foram fornecidos por cinco estações distintas. A elaboração do arquivo .dat deve seguir

formato específico, pois este será lido durante a execução do modelo. A Figura 14 demonstra o formato utilizado do arquivo de entrada rain.dat.

Figura 14 – Planilha rain.dat

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
4	@dataSetAttribs								
5	missingDataVal	-9999		Valor que indica ausência de dados					
6	dataStart	01.01.2000 07:30		Data de início dos dados					
7	dataEnd	31.12.2017 07:30		Data de término dos dados					
8	tres	d		Resolução temporal					
9	@statAttribVal								
10	name	CRHEA	ANA	IGNACIO_	MONTE_A	IGNACIO_2		Nome da estação	
11	ID	11	12	13	14	15		ID da estação	
12	elevation	733	747	749	752	832		Elevação da estação	
13	x	201070	195030	195437	195462	197150		Coordenada UTM x	
14	y	7545439	7537525	7543277	7543330	7538488		Coordenada UTM y	
15	dataColumn	1	2	3	4	5			
16	@dataVal								
17	01.01.2000	07:30	18.1	0	-9999	-9999	-9999		
18	02.01.2000	07:30	3.8	18	-9999	-9999	-9999		
19	03.01.2000	07:30	66.8	57.4	-9999	-9999	-9999		
20	04.01.2000	07:30	3.8	4.4	-9999	-9999	-9999		
21	05.01.2000	07:30	7.4	15	-9999	-9999	-9999		

Fonte: Autor.

3.2.2.3 Temperatura, insolação, umidades relativa e absoluta e velocidade do vento

Apenas a estação climatológica do CRHEA forneceu os dados de temperatura (mínima, média e máxima), insolação, umidade relativa e velocidade do vento, representados pelos arquivos de entrada: tmin.dat, tmean.dat, tmax.dat, sunh.dat, rhum.dat e wind.dat, respectivamente. A umidade absoluta (ahum.dat) foi calculada manualmente utilizando os dados de umidade relativa e temperatura média, pela Equação 8 (VAISALA, 2013).

$$ahum = C \cdot \frac{P_{ws}(T)}{T} \cdot \frac{rhum}{100} [g \cdot m^{-3}] \quad (8)$$

Em que: C é a constante universal dos gases (2,16679 g.K.J⁻¹); P_{ws} é a pressão de saturação de vapor (Pa) em função da temperatura (Tabela 3); T é a temperatura média do ar (K) e rhum é a umidade relativa do ar.

Tabela 3 – Pressão de saturação de vapor em função da temperatura do ar

T	P_{ws}	T	P_{ws}	T	P_{ws}
(°C)	(Pa)	(°C)	(Pa)	(°C)	(Pa)
0	613	18	2066	36	5946
1	653	19	2200	37	6279
2	707	20	2333	38	6626
3	760	21	2493	39	6986
4	813	22	2640	40	7373
5	867	23	2813	41	7773
6	933	24	2986	42	8199
7	1000	25	3173	43	8639
8	1080	26	3360	44	9106
9	1147	27	3560	45	9586
10	1227	28	3786	46	10092
11	1307	29	4000	47	10612
12	1400	30	4240	48	11159
13	1493	31	4493	49	11732
14	1600	32	4760	50	12332
15	1707	33	5026	51	12959
16	1813	34	5320	52	13612
17	1933	35	5626	53	14216

Fonte: Vaisala (2013).

O formato dos arquivos de entrada, nesse caso, segue modelo análogo ao apresentado no tópico anterior.

3.3 Descrição do modelo J2K/JAMS

A seguir são elencados alguns elementos importantes do J2K e seus módulos (KRAUSE, 2001).

3.3.1 Parâmetros hidrogeológicos atemporais

O armazenamento hídrico máximo no solo de poros grandes (MaxLPS), Equação 9,

considera toda a coluna do solo, incluindo a zona não saturada, e o armazenamento máximo no solo de poros médios (MaxMPS), Equação 10, tem sua profundidade coincidente com a das raízes da vegetação.

$$MaxLPS = Ac \cdot \text{Área da bacia} \cdot mAc \text{ [mm]} \quad (9)$$

$$MaxMPS = (\sum Fc) \cdot \text{Área da bacia} \cdot mFc \text{ [mm]} \quad (10)$$

Em que: Ac (capacidade de ar) e Fc (capacidade de campo por decímetro de solo) são dados de entrada, e não devem ser calibrados, enquanto mAc (multiplicador da capacidade de ar) e mFc (multiplicador da capacidade de campo) são passíveis de calibração.

A partir desses valores é obtida a saturação do (Equação 11). Quando não há valores de θ_{MPS} e θ_{LPS} (saturações relativas iniciais referentes a cada grau de porosidade do solo) definidos pelo usuário, o modelo assume estes como zero.

$$\theta_{Soil} = \frac{\theta_{MPS} \cdot MaxMPS + \theta_{LPS} \cdot MaxLPS}{MaxMPS + MaxLPS} \quad (11)$$

Em seguida, MaxRG1 e MaxRG2 (compartimentos de armazenamento máximo de água subterrânea) são determinados conforme as Equações 12 e 13 a partir dos parâmetros de entrada $RG1_{max}$ e $RG2_{max}$, sendo que os valores iniciais de preenchimento desses depósitos subterrâneos são definidos pelo usuário como initRG1 e initRG2 durante a calibração.

$$MaxRG_1 = RG1_{max} \cdot \text{Área [mm]} \quad (12)$$

$$MaxRG_2 = RG2_{max} \cdot \text{Área [mm]} \quad (13)$$

3.3.2 Regionalização dos dados climáticos

Para o J2K, valores diários de precipitação, mínimos e máximos de temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa e insolação são variáveis que compõem o cerne do modelo. Para conversão desses dados pontuais em conjuntos distribuídos de dados, o J2K conta com métodos de regionalização implementados em seu pré-processador. Esses métodos analisam variações verticais (i.e. queda de temperatura com acréscimo de altitude) e horizontais

(i.e. variações horizontais de precipitação).

Inicialmente determina-se a regressão linear entre valores diários das estações e suas elevações.

$$RL = a_H + b_H \cdot H \quad (14)$$

Em que: H é a elevação do terreno (m) e a_H e b_H os coeficientes angular e linear da regressão, respectivamente.

Os valores desconhecidos de a_H e b_H são determinados pelo método Gaussiano dos Mínimos Quadrados.

$$b_H = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})(RL_i - \bar{RL})}{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2} \quad (15)$$

Em que: D_i é o valor da variável efetivamente medido e H_i a elevação da estação.

$$a_H = \bar{RL} - b_H \cdot \bar{H} \quad (16)$$

O coeficiente de correlação da regressão é então calculado.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})(RL_i - \bar{RL})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2 \sum_{i=1}^n (RL_i - \bar{RL})^2}} \quad (17)$$

O número n de estações de medição que se encontram próximas a cada URH deve ser definido com antecedência. As distâncias $Dist(i)$ de cada estação para a URH mais próxima é calculada pela Equação 18, na qual o primeiro termo ($L_{est} - L_{URH}$) é a diferença entre os avanços para leste das estações e sua URH de interesse, respectivamente, e o segundo termo ($N_{est} - N_{URH}$) é a diferença entre os avanços para norte.

$$Dist(i) = \sqrt{(L_{est(i)} - L_{URH})^2 + (N_{est(i)} - N_{URH})^2} [m] \quad (18)$$

As distâncias destas estações são convertidas para distâncias ponderadas ($wDist(i)$), Equação 19, por meio de potencialização via fator de ponderação $pIDW$ (*inverse distance*

weighted, ou ponderação pelo inverso da distância), o qual permite que a influência de estações próximas seja aumentada e de estações distantes reduzida. Valores de $pIDW$ de 2 ou 3 são ideais (MARCUIZZO et al., 2011).

$$wDist(i) = \frac{1}{(Dist(i)(x, x_i))^{pIDW}} \quad (19)$$

Por meio da técnica de interpolação IDW, os pesos das n estações são definidos de maneira dependente às suas distâncias para cada URH, dessa forma, a variabilidade horizontal dos dados das estações é levada em consideração de acordo com sua posição na bacia (Equação 20).

$$W(i) = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n wDist(i)}{wDist(i)}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{i=1}^n wDist(i)}{wDist(i)} \right)} \quad (20)$$

O cálculo dos dados das estações para cada URH é feito conforme a Equação 21, porém, nos casos em que a elevação da estação que produziu os dados tem efeito sobre alguns dos dados (como, por exemplo, para os dados de pressão ou temperatura), a Equação 22 é aplicada.

$$DP = \sum_{i=1}^n RL(i).W(i) \quad (21)$$

$$DP = \sum_{i=1}^n ((\Delta H(i).b_H + RL(i).W(i))) \quad (22)$$

3.3.3 Cálculo da evapotranspiração

A evapotranspiração potencial é calculada de acordo com Penman-Monteith (FAO, 1998), dentro da unidade de pré-processamento do J2K, usando os dados climáticos regionalizados e os parâmetros de vegetação específicos para cada URH. A equação considera condições físicas, como temperatura e velocidade do vento, bem como parâmetros mais restritos referentes à vegetação, como resistência aerodinâmica, resistência hidráulica e peso líquido.

O cálculo da evapotranspiração é feito em múltiplas etapas, tendo diversos parâmetros atribuídos à equação de Penman-Monteith. Os cálculos para o dia e para a noite são realizados conforme as Equações 23 e 24, respectivamente (KRAUSE, 2001). A Tabela 4 lista os parâmetros das Equações 23 e 24, sendo que as letras ‘d’ e ‘n’ subscritas indicam períodos

diurnos e noturnos, respectivamente.

$$ETP_d = \frac{\frac{1}{L_d} \cdot S_d \cdot (R_{Nd} - G_d) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{e_{s_d} - e_s}{r_a}}{s_d + \gamma_d \cdot \left(1 + \frac{r_{s_d}}{r_a}\right)} \cdot \left(1 - \frac{S_0}{24}\right) [mm] \quad (23)$$

$$ETP_n = \frac{\frac{1}{L_n} \cdot S_n \cdot (R_{Nn} - G_n) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{e_{s_n} - e_s}{r_a}}{s_n + \gamma_n \cdot \left(1 + \frac{r_{s_n}}{r_a}\right)} \cdot \left(1 - \frac{S_0}{24}\right) [mm] \quad (24)$$

Tabela 4 – Termos das Equações 23 e 24

Parâmetro	Definição
$L_{d,n}$	Calor latente de evaporação ($Wm^{-2} \cdot mm^{-1} \cdot d$)
$s_{d,n}$	Declividade da curva de pressão de vapor (hPa^{-1})
$R_{N\ d,n}$	Balanço de radiação solar (Wm^{-2})
$G_{d,n}$	Fluxo de calor do solo (Wm^{-2})
P	Densidade do ar (kgm^{-3})
c_p	Capacidade de calor específico do ar para pressão constante ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
$e_{s\ d,n}$	Pressão de saturação do vapor (hPa)
$e_{d,n}$	Pressão de vapor (hPa)
r_a	Resistência aerodinâmica da cobertura vegetal (sm^{-1})
$\gamma_{d,n}$	Constante psicrométrica ($hPaK^{-1}$)
$r_{s\ d,n}$	Resistência superficial da cobertura do solo (sm^{-1})
S_0	Duração da insolação possível (h)

Fonte: Krause (2001).

Os valores de temperatura do ar, T_d e T_n (Equações 25 e 26), que são necessários ao cálculo do balanço do saldo de radiação, advêm dos dados de temperatura máxima e mínima, bem como das médias diárias:

$$T_d = \frac{T_{max} + T_{mean}}{2} [^{\circ}C] \quad (25)$$

$$T_n = \frac{T_{min} + T_{mean}}{2} [^{\circ}C] \quad (26)$$

O calor latente de evaporação (L) é calculado conforme as Equações 27 e 28.

$$L_d = 28,9 - 0028.T_d [W.m^{-2}.mm.d^{-1}] \quad (27)$$

$$L_n = 28,9 - 0028.T_n [W.m^{-2}.mm.d^{-1}] \quad (28)$$

A pressão de saturação do vapor (e_s) é calculada de acordo com a fórmula de Magnus (1844), utilizando os coeficientes de Sonntag (1998) (Equações 29 e 30).

$$e_{s,d} = 6,11. e^{\frac{17,62.T_d}{243,12+T_d}} [hPa] \quad (29)$$

$$e_{s,n} = 6,11. e^{\frac{17,62.T_n}{243,12+T_n}} [hPa] \quad (30)$$

A pressão de vapor real (e) resulta da pressão de saturação do vapor (e_s) e da umidade relativa do ar (U) (Equações 31 e 32).

$$e_d = e_{s,d} \cdot \frac{U}{100} [hPa] \quad (31)$$

$$e_n = e_{s,n} \cdot \frac{U}{100} [hPa] \quad (32)$$

A declividade da curva de pressão de vapor é calculada a partir da saturação de pressão de vapor (e_s) e a temperatura do ar (T) (Equações 33 e 34).

$$s_d = e_{s,d} \cdot \left(\frac{4284}{(243,12+T_d)} \right) [hPa.K^{-1}] \quad (33)$$

$$s_n = e_{s,n} \cdot \left(\frac{4284}{(243,12+T_n)} \right) [hPa.K^{-1}] \quad (34)$$

A pressão do ar a uma altura z é obtida a partir de uma fórmula barométrica adaptada (Equações 35 e 36).

$$p_{z,d} = p_0 \cdot e^{-\left(\frac{g}{R.T_{abs,d}}.z\right)} [hPa] \quad (35)$$

$$p_{z,n} = p_0 \cdot e^{-\left(\frac{g}{R \cdot T_{absn}} \cdot z\right)} [hPa] \quad (36)$$

Em que: p_0 é a pressão do ar ao nível do mar (1013 hPa); g é a aceleração da gravidade (9,811 m/s²); R é a constante universal dos gases (8314,3 J.(kmol.K)⁻¹); e T_{abs} é a temperatura absoluta do ar (K).

A constante psicrométrica (γ) é calculada conforme as Equações 37 e 38.

$$\gamma_d = \frac{c_p \cdot p_d}{0,622 \cdot L_d \cdot 86400} [hPa \cdot K^{-1}] \quad (37)$$

$$\gamma_n = \frac{c_p \cdot p_n}{0,622 \cdot L_n \cdot 86400} [hPa \cdot K^{-1}] \quad (38)$$

Em que: 0,622 é a relação entre o peso molecular do vapor de água e do ar seco.

A radiação extraterrestre (R_0), Equação 39, é calculada com base na latitude e na variação anual do ângulo de incidência da luz solar (Equação 40).

$$R_0 = \frac{1}{8,64} \cdot [245 \cdot (9,9 + 7,08 \cdot \sin \zeta) + 0,18 \cdot (\varphi - 51) \cdot (\sin \zeta)] [W \cdot m^{-2}] \quad (39)$$

$$\zeta = 0,0172 \cdot (dia \text{ Juliano}) - 1,39 \quad (40)$$

Em que: ζ (°) é o ângulo de incidência do sol e φ (°) é a latitude.

A radiação global (R_G), Equação 41, é calculada com base na radiação extraterrestre (R_0) e na nebulosidade.

$$R_G = R_0 \cdot \left(a + b \cdot \frac{S}{S_0} \right) [W \cdot m^{-2}] \quad (41)$$

Este modelo estatístico de Martinez-Lozano et al. (1984) considera o grau de nebulosidade, o qual é aproximado pela relação entre a quantidade de horas de sol e a quantidade possível astronômica para um céu desobstruído (S_0) com o auxílio de uma relação empírica de acordo com a fórmula de Ångström, sendo que, conforme recomendação da FAO (1998), os valores de a e b deverão ser iguais a 0,25 e 0,50, respectivamente.

A radiação efetiva de ondas longas (R_L), Equações 42 e 43, é calculada com base na

radiação de corpo negro de Boltzmann (1844), o grau de nebulosidade e uma função empírica do conteúdo de vapor de água no ar.

$$R_{L,d} = \sigma \cdot T_{abs}^4 \cdot \left(0,1 + 0,9 \cdot \frac{S}{S_0}\right) \cdot (0,34 - 0,044 \cdot \sqrt{e_d}) [W \cdot m^{-2}] \quad (42)$$

$$R_{L,n} = \sigma \cdot T_{abs}^4 \cdot \left(0,1 + 0,9 \cdot \frac{S}{S_0}\right) \cdot (0,34 - 0,044 \cdot \sqrt{e_n}) [W \cdot m^{-2}] \quad (43)$$

Em que: σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$).

O cálculo da quantidade possível de horas de sol (S_0) para um céu desobstruído (Equação 44) é feito com base na latitude.

$$S_0 = 12,3 + \text{sen}\zeta \cdot \left(4,3 + \frac{\varphi - 51}{6}\right) [h] \quad (44)$$

O balanço de radiação solar (R_N), Equações 45 e 46, é calculado com base na radiação global (R_G), na radiação efetiva de ondas longas (R_L) e no albedo da cobertura vegetal (alb).

$$R_{N,d} = (1 - alb) \cdot R_G - R_{L,d} [W \cdot m^{-2}] \quad (45)$$

$$R_{N,n} = 0 - R_{L,n} [W \cdot m^{-2}] \quad (46)$$

Por fim, o fluxo de calor no solo (G) é calculado por uma relação simplificada (Equações 47 e 48).

$$G_d = 0,2 \cdot R_{N,d} [W \cdot m^{-2}] \quad (47)$$

$$G_n = 0,2 \cdot R_{N,n} [W \cdot m^{-2}] \quad (48)$$

3.3.4 Módulo de interceptação

Esse módulo é o primeiro processo simulado, o qual é executado seguindo uma abordagem simples. O algoritmo calcula a máxima capacidade de armazenamento de interceptação da cobertura vegetal por meio do índice de área foliar (LAI). Qualquer valor de

precipitação que exceda a capacidade de armazenamento da vegetação é passado como chuva excedente para o módulo solo-água (DICKINSON, 1984).

O módulo de interceptação calcula o saldo de precipitação a partir dos dados das estações da bacia, tendo como base a cobertura vegetal e seu desenvolvimento ao longo do ano. O excesso é então enviado para o módulo seguinte. A interceptação máxima (Int_{max}) é calculada pela Equação 49, em que α representa a capacidade de armazenamento da área foliar por metro quadrado e LAI representa o índice de área foliar específico da classe de uso do solo.

$$Int_{max} = \alpha \cdot LAI [mm] \quad (49)$$

3.3.5 Módulo solo-água

O módulo principal do J2K reflete a posição central do solo, atuando como regulador e distribuidor e influenciando quase todos os processos do ciclo hidrológico. A água proveniente dos módulos anteriores, ao ser somada à água armazenada nas depressões é primeiramente ser afetada por esse processo. Como o J2K simula o balanço hídrico em intervalos diários, algoritmos físicos como a equação de Richard ou o modelo Green-Ampt não podem ser usados, pois eles requerem uma resolução temporal maior de dados. O fluxograma da Figura 15 resume o conceito do módulo solo-água.

Fonte: Adaptado de Krause (2001).

Este módulo é estruturado em unidades de processo (infiltração, evapotranspiração) e unidades de armazenamento (MPS, LPS e depressões). Inicialmente, um método empírico estima a capacidade de infiltração a partir da saturação da água no solo, e uma taxa de infiltração máxima é estimada, a qual funciona como um limiar. Quando esse limiar é excedido, o excesso de água é armazenado na depressão ou escoado diretamente na superfície. A quantidade máxima de água que pode ser contida nas depressões é denominada *soilMaxDPS*. A água da chuva que não infiltra e não é armazenada em depressões escoar superficialmente.

De modo a calcular a infiltração (*Inf*), Equação 50, um método empírico é usado no J2K. Para esse propósito, uma infiltração máxima (*MaxInf*), em mm.d^{-1} deve ser definida pelo usuário, a qual serve como fator multiplicativo sobre o déficit de saturação relativo do solo ($1 - \text{soil}_{\text{sat}}$).

$$Inf = (1 - \text{soil}_{\text{sat}}) \cdot \text{MaxInf} [\text{mm}] \quad (50)$$

O cálculo da saturação relativa do solo ocorre conforme a Equação 51.

$$\text{soil}_{\text{sat}} = \frac{\text{MPS}_{\text{at}} + \text{LPS}_{\text{at}}}{\text{MPS}_{\text{max}} + \text{LPS}_{\text{max}}} \quad (51)$$

Em que: ‘at’ representa o armazenamento no instante, enquanto ‘max’ é o armazenamento máximo do solo de poros médios (MPS) ou grandes (LPS).

Dois cenários de infiltração são considerados para a definição da taxa máxima de infiltração. Estando eles definidos nos parâmetros *MaxInfSummer* e *MaxInfWinter*, representando as condições especiais de infiltração para a chuva convectiva de curta duração do verão e a infiltração durante o inverno, respectivamente. Se o montante de água que deve infiltrar for maior do que a taxa de infiltração máxima (*MaxInfSummer* para o verão ou *MaxInfWinter* para o inverno) estipulado pelo usuário, o excesso é armazenado na depressão ou drena como escoamento superficial. Ademais, a infiltração é influenciada pelo grau de selamento da superfície. Em uma área mais de 80% impermeável, apenas 25% da água da chuva infiltra no solo; enquanto em áreas com menos de 80% de impermeabilidade, 60% da precipitação infiltra. A água da chuva infiltrada é alocada aos depósitos de poros médios e grandes, conforme a demanda relativa ao déficit de saturação. O influxo no MPS (MPS_{in}) resulta da precipitação infiltrada (*Inf*) sobre o conteúdo relativo armazenado (θMPS) assim como do coeficiente de calibração (*DistMPSLPS*) definido pelo usuário. MPS_{in} é calculado pela

Equação 52.

$$MPS_{in} = Inf. \cdot (1 - e^{\left(\frac{-DistMPSLPS}{\theta_{MPS}}\right)}) [mm] \quad (52)$$

A quantidade de água de chuva infiltrada, que não é absorvida pelo MPS, é transferida ao depósito de poros grandes (LPS_{in} , Equação 53).

$$LPS_{in} = Inf - MPS_{in} [mm] \quad (53)$$

A amplitude do coeficiente $DistMPSLPS$ pode estar entre zero (em que nenhuma quantidade de água escoar para o MPS) e infinito. A descarga que sai do MPS ocorre exclusivamente via evapotranspiração (ETP), que é calculada a partir do armazenamento do MPS durante a iteração e a evapotranspiração potencial.

O movimento vertical (percolação) e lateral (interfluxo) da água dentro do solo ocorre exclusivamente no LPS, sendo dependente da quantidade de poros grandes. A quantidade total de escoamento do LPS (LPS_{out}), Equação 54, que se divide nas duas componentes supracitadas precisa ser calculada a partir da saturação relativa do solo ($soil_{sat}$), o conteúdo do depósito de poros grandes (LPS_{act}) e um coeficiente de calibração ($OutLPS$).

$$LPS_{out} = (soil_{sat})^{LPS_{out}} \cdot LPS_{act} [mm] \quad (54)$$

A alocação do escoamento do LPS na direção vertical ($perc$, Equação 55) e lateral ($inter$, Equação 56) depende da declividade entre as unidades de resposta hidrológica e de um fator de calibração $LatVertLPS$.

$$perc = LPS_{out} \cdot (1 - tg(declividade) \cdot LatVertLPS) [mm] \quad (55)$$

$$inter = LPS_{out} \cdot (tg(declividade) \cdot LatVertLPS) [mm] \quad (56)$$

A taxa de percolação pode ser restringida pelo usuário, através do coeficiente $maxPerc$, que representa a taxa máxima diária de percolação. Quando a taxa máxima é superada, o excesso de água é transportado como interfluxo. A taxa de percolação máxima resulta da permeabilidade hidráulica e da quantidade de poros grandes e macro-poros, e pode apenas ser estimada vagamente. A água que está no LPS após uma iteração pode se difundir no MPS

(LPS2MPS, Equação 57) quando o conteúdo do depósito LPS (LPS_{act}), a saturação relativa de MPS (θ_{MPS}) e o coeficiente DiffMPSLPS são considerados.

$$LPS2MPS = LPS_{act} \cdot (1 - e^{\left(\frac{-DiffMPSLPS}{\theta_{MPS}}\right)}) [mm] \quad (57)$$

O parâmetro de calibração DistMPSLPS também pode variar de zero a infinito. Não há difusão quando o valor é zero. Quando o parâmetro é maior do que 5, praticamente toda a água do LPS se difunde para o MPS.

Enquanto a percolação é limitada pela taxa máxima definida pelo usuário, o escoamento (em termos de escoamento superficial, genRD1; e interfluxo, genRD2) pode ser desacelerado (Equação 58) através de um coeficiente de retenção, específico para cada caso (ConcRD₁ e ConcRD₂).

$$RD_{1,2} = \frac{1}{ConcRD_{1,2}} \cdot genRD_{1,2} [mm] \quad (58)$$

Se o valor de ConcRD for maior do que 1, o escoamento é desacelerado e o excesso de água permanece no depósito em que se encontra até a próxima iteração.

3.3.6 Módulo de águas subterrâneas

O conceito deste módulo no J2K leva em conta o efeito que as formações geológicas presentes na bacia estudada causam no escoamento de base. Nas unidades geológicas individuais há uma distinção entre os reservatórios de água subterrânea superiores (RG1) com seu material intemperizado de alta permeabilidade, e os reservatórios inferiores (RG2) com suas fissuras e fraturas da rocha-mãe. Consequentemente, dois componentes do escoamento de base são criados: um componente rápido para o reservatório superior e um lento para o inferior.

O preenchimento do reservatório subterrâneo resulta do componente vertical de escoamento do módulo anterior (solo-água). A depleção pode ocorrer por meio de escoamento lateral subterrâneo e pela capilaridade da zona insaturada. A parametrização dos reservatórios subterrâneos define a máxima capacidade de armazenamento do reservatório superior (maxRG2) e do inferior (maxRG1), e também um coeficiente de retenção para ambos (kRG1 e kRG2), devendo estes últimos serem definidos para cada unidade geológica separadamente.

O cálculo do saldo de água (Equações 59 e 60) é realizado a partir do armazenamento atual dos reservatórios por meio de uma função linear de drenagem. Os coeficientes de retenção dos depósitos, que podem ser vistos como tempo de residência da água em um determinado

depósito, são considerados como fatores multiplicativos ($actRG1$ e $actRG2$) para o cálculo do escoamento da água subterrânea ($outRG1$ e $outRG2$).

De modo a considerar as dinâmicas de escoamento dos reservatórios subterrâneos, os escoamentos $outRG1$ e $outRG2$ são multiplicados pelos parâmetros de calibração $gwRG1Fact$ e $gwRG2Fact$, para os reservatórios superiores e inferiores, respectivamente, não podendo esses serem menores do que zero.

$$outRG1 = \frac{1}{gwRG1Fact.kRG1} \cdot actRG1 [mm] \quad (59)$$

$$outRG2 = \frac{1}{gwRG2Fact.kRG2} \cdot actRG2 [mm] \quad (60)$$

Para uma adaptação mais adequada à área de drenagem, o coeficiente de calibração $gwRG1RG2dist$ deve ser configurado. Este parâmetro influencia a alocação do conteúdo de água percolado do módulo solo-água ($perc$) para ambos os reservatórios de água subterrânea para cada URH, em função da declividade. O influxo de águas subterrâneas nos dois compartimentos ($inRG1$ e $inRG2$) é calculado de acordo com as Equações 61 e 62.

$$inRG1 = perc \cdot (1 - (1 - tg(declividade))) \cdot gwRG1RG2dist [mm] \quad (61)$$

$$inRG2 = perc \cdot (1 - tg(declividade)) \cdot gwRG1RG2dist [mm] \quad (62)$$

Adicionalmente, a elevação capilar da água subterrânea ($GW2MPS$), Equação 63, tem uma influência relevante no preenchimento do armazenamento do solo em áreas planas com elevadas quantidades de água subterrânea, ou seja, em planícies de inundação extensas. Para que essa circunstância seja levada em consideração, o depósito de poros médios com espaços livres (ΔMPS), resultante da diferença entre o valor máximo de armazenamento no MPS e o valor instantâneo de armazenamento, é multiplicado por um fator empiricamente gerado. O coeficiente de calibração $gwCapRise$, bem como a saturação relativa do MPS (θMPS) são utilizados para o cálculo desse fator.

$$GW2MPS = \Delta MPS \cdot \left(1 - e^{-\frac{gwCapRise}{\theta MPS}}\right) [mm] \quad (63)$$

3.3.7 Módulo de roteamento lateral

A geração de escoamento é simulada dentro do centro de modelagem do J2K, que considera processos singulares a cada URH (Figura 16). Nesse sentido, os dados de entrada regionalizados são usados como parâmetros de diretriz em conjunto com os parâmetros fisiográficos inerentes a cada URH da bacia.

Figura 16 – Representação do escoamento superficial nas URHs, onde as setas vermelhas indicam a transferência de massa entre URHs adjacentes

Fonte: Machado (2012).

O módulo de roteamento lateral descreve a transferência de água dentro de um fluxo de cascata de URH para URH, desde a cabeceira da bacia até o rio. Visto que os mecanismos de retenção e escoamento já estão descritos nos outros módulos, neste módulo apenas os influxos e escoamentos entre URHs são alocados. A transferência de água entre URHs ocorre na relação n:1. Logo, uma URH pode ter vários influxos mas apenas uma saída. A ordem das URHs receptoras é determinada pelas identificações (ID) topológicas definidas durante a discretização do mapa de URHs, que são registradas no arquivo .dat, o qual também apresenta quais URHs escoam para o rio.

3.3.8 Módulo de roteamento fluvial

Este módulo descreve o fenômeno de escoamento em canais na forma de uma onda cinemática e o cálculo da velocidade é feito de acordo com Manning-Strickler (LENCASTRE, 1983). O único parâmetro que deve ser inserido é um coeficiente de roteamento (TA) que representa o tempo de deslocamento da onda de escoamento que se move da cabeceira para o canal até atingir o exutório, após um evento de chuva. Seu valor, bem como a velocidade de escoamento do rio (v) e o seu comprimento (fl) são necessários para o cálculo do coeficiente de retenção do escoamento (Rk), da Equação 64.

$$Rk = \frac{v}{fl} \cdot TA \cdot 3600 \quad (64)$$

Porém, primeiramente é necessário calcular a velocidade v_{new} do escoamento (Equação 66), com o fator de rugosidade de Manning (M), a declividade do leito do rio (I) e o raio hidráulico (Rh), da Equação 65. O raio hidráulico é calculado considerando-se a seção transversal drenada (A , Equação 66), do trecho que resulta da taxa de fluxo (q), a velocidade de escoamento (v) e a largura do rio (b). Para essa abordagem, um valor inicial de velocidade de escoamento (v_{init}) de 1 m/s deve ser assumido, o qual é iterativamente ajustado com o valor calculado de v_{new} até que o desvio entre ambos seja menor do que 0,001 m/s.

$$Rh = \frac{A}{b + \frac{2A}{b}} [m] \quad (65)$$

Em que:

$$A = \frac{q}{v_{init}} [m^2] \quad (66)$$

Então:

$$v_{new} = M \cdot Rh^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{3}} [m^3/s] \quad (67)$$

Finalmente, a descarga do trecho do rio (q_{act}) que é escoada (q), Equação 68, é calculada a partir do coeficiente de retenção de escoamento obtido anteriormente (Rk):

$$q = q_{act} \cdot e^{\left(-\frac{1}{Rk}\right)} [m^3/s] \quad (68)$$

Quanto maior o valor de TA, mais rapidamente se moverá a onda de descarga dentro de um intervalo de tempo, e por menos tempo a água permanecerá dentro do canal.

3.4 Elaboração do modelo

3.4.1 Unidades de resposta hidrológica

A discretização das URHs é realizada por meio da sobreposição de quatro diferentes mapas: mapa geológico, de solos, de uso e ocupação do solo e o modelo digital de elevação (MDE). O processo é realizado na versão *web* do GRASS-HRU, que é um *addon* do QGIS. Além dos quatro mapas, também é necessário dar entrada à posição do exutório (no caso, onde a estação fluviométrica está localizada), para que, a partir do MDE, os limites da área de drenagem sejam delimitados. Durante o processo, o programa inicialmente classifica os parâmetros físicos como declividade e aspecto (direção do escoamento), permitindo ao usuário, caso necessite, alterar a quantidade de direções consideradas no aspecto (optou-se por manter o padrão de 4 classes de direção, Norte, Sul, Leste e Oeste) ou as classes de declividade (também mantidas como padrão). O processo completo está ilustrado no Apêndice B (Figura 65 e Figura 71). Finda a discretização, um arquivo de parâmetros é gerado (hrus.par) juntamente com mapas de aspecto e das sub-bacias (em formato .tif) e mapas dos canais fluviais e das URHs (em formato .shp), sendo os dois últimos utilizados como entrada para execução do modelo, devendo estar localizados na pasta input/local/gis/streams e /hrus.

3.4.1.1 Geologia

O mapa digital de geologia do Estado de São Paulo (PERROTA et al., 2005) foi usado para criação do mapa de geologia da bacia do Ribeirão da Onça (Figura 17).

Figura 17 – Mapa geológico da bacia do Ribeirão da Onça

Fonte: Autor.

3.4.1.2 Tipos de solo

Castro Junior e Wendland (2008) observaram que a bacia é, em grande parte, formada por Neossolo Quartzarênico (RQ). Tendo em vista a grande amplitude de profundidades de solo observadas na bacia por meio de poços de monitoramento, e, conhecendo-se a limitação do modelo JAMS/J2K em atribuir múltiplos valores de espessura para um mesmo tipo de solo, Machado (2012) recomendou utilizar um único tipo de solo (Neossolo Quartzarênico) na criação de um mapa de saturação do solo, com valores distintos de espessura. Sendo assim, elaborou-se o mapa da Figura 18 utilizando a interpolação das profundidades do nível freático produzida por Guanabara (2011).

Figura 18 – Mapa de profundidades do nível freático da bacia do Ribeirão da Onça

Fonte: Autor.

3.4.1.3 *Uso e ocupação do solo*

A bacia é predominantemente agrícola (Figura 19), com plantações de eucalipto cobrindo a maior parte de sua área atualmente (35%), seguido de citros (31,63%), solo exposto (19,43%), mata nativa (7,93%), pasto (5,51%), cana-de-açúcar (0,36%) e capim (0,15%). A evolução temporal do uso do solo pode ser verificada na série de mapas produzida por Manzione et al. (2011) a partir da classificação de imagens Landsat (Figura 20).

Figura 19 – Usos do solo predominantes na BRO atualmente

Mata nativa

Citros

Cana-de-açúcar

Eucalipto

Solo exposto

Pasto

Fonte: Autor.

Figura 20 – Mapas de uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão da Onça para os anos de 2003 (a), 2005 (b), 2008 (c) e 2010 (d) gerados a partir da classificação de imagens Landsat

Fonte: Manzione et al. (2011).

Contudo, devido ao fato de o modelo atuar com variações intra-anuais dos parâmetros de uso do solo, novos mapas tiveram que ser elaborados, com as seguintes diretrizes:

- i. Culturas de crescimento rápido como a cana-de-açúcar e soja tiveram seus períodos de entressafra ignorados, ou seja, os fragmentos de solo exposto presentes nessas porções de uso do solo foram substituídos pela cultura original;
- ii. Culturas de crescimento lento como eucalipto e citros mantiveram seus fragmentos de solo exposto, quando presentes.

Sabendo-se que os principais dados hidrológicos tiveram sua coleta iniciada em 2004, foram confeccionados apenas mapas de uso do solo dos anos de 2008, 2011, 2013, 2015 e 2017. A Tabela 5 contém informações acerca dos mapas elaborados.

Tabela 5 – Informações sobre os mapas de uso do solo

Mês e ano de referência	Satélite	Representação no modelo
Set/2008	LandSat 7	Jan/2008 - Dez/2009
Dez/2011	LandSat 7	Jan/2011 - Dez/2012
Dez/2013	LandSat 7	Jan/2013 - Dez/2014
Out/2015	LandSat 8 e RapidEye	Jan/2015 - Dez/2016
Jan/2017	LandSat 8	Jan/2016 - Dez2017

Fonte: Autor.

Foi dada preferência a imagens geradas durante o verão. Os mapas de uso e ocupação do solo foram elaborados utilizando o software ArcGIS 10.2.2. Utilizou-se a técnica de classificação não supervisionada para estabelecimento dos fragmentos de uso do solo mais extensos complementada por edição com interpretação visual direta sobre imagem e observação em campo. Um conjunto de assinaturas espectrais foi gerado para cada ano considerado, de modo a não permitir que variações na nebulosidade e albedo afetassem o produto final.

3.4.1.4 Modelo digital de elevação

Ehsani et al. (2010) afirmam que os modelos digitais de elevação são o elemento principal no delineamento das URHs, pois fornecem a declividade, orientação da vertente e elevação da bacia. O MDE (Figura 21) utilizado neste trabalho foi obtido no EarthExplorer, do Serviço Geológico dos Estados Unidos. O MDE, derivado de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução de resolução 30 m e geradas em 2014, foi então tratado no software ArcGIS 10.2.2.

Figura 21 – MDE da bacia do Ribeirão da Onça

Fonte: Autor.

3.4.2 Adaptação do modelo J2K

A construção do modelo foi realizada utilizando a interface *JUICE Builder* do *framework* JAMS, versão 3.8. Adaptações foram executadas no modelo exemplo que é instalado junto com o *software*, o J2K_gehlberg. As alterações mais expressivas estão apresentadas neste tópico.

Inicialmente, removeu-se o componente que corrige os erros advindos de medições de precipitação por radar (RCRichter) (Figura 22), visto que para o modelo a ser desenvolvido para a bacia do Ribeirão da Onça seriam utilizados apenas os dados medidos de precipitação.

Figura 22 – Componente RCRichter

Fonte: Autor.

Também foi necessário acrescentar cinco novos componentes no contexto espacial HRULoop (Figura 23), o qual agrega os componentes com processos que interagem com as URHs e suas adjacências. Os componentes adicionados são da classe *DoubleDivide*, da biblioteca *jams.componentes.calc*, a qual calcula a divisão entre duas variáveis do tipo *Double* e retorna o resultado. Neste caso, dividiram-se os atributos de contexto HRULoop.genRD1, HRULoop.genRD2, HRULoop.genRG1, HRULoop.genRG2 e HRULoop.actET pelo atributo HRULoop.area, para se obter os valores desses atributos em mm e permitir uma melhor visualização no mapa.

Figura 23 – Adição de novos componentes no contexto HRULoop

Fonte: Autor.

Além disso, foi necessário alterar a projeção utilizada no componente CalcLatLong (Figura 24), que gerencia o sistema de coordenadas e o converte para latitude-longitude.

Figura 24 – Alteração da projeção no componente CalcLatLong

Fonte: Autor.

Também foram alterados os atributos do componente ExtRad, que calcula a radiação incidente durante o período de um ano, baseando-se na localização da bacia (Figura 25). Alterou-se a longitude (48°) e a referência ao meridiano de Greenwich (Oeste).

Figura 25 – Alterações no componente ExtRad

Fonte: Autor.

Por fim, foi necessário alterar o período de execução do modelo e a localização da área de trabalho (*workspace*) do modelo, onde ficaram localizados os arquivos de entrada, como os parâmetros não calibráveis, os dados hidrometeorológicos, os vetores de URHs e canais fluviais, entre outros (Figura 26).

Figura 26 – Alterações da localização da área de trabalho e do período de execução

Fonte: Autor.

3.4.3 Configuração do módulo de otimização OPTAS

O módulo OPTAS (*Optimization Assistant*) do *framework* JAMS auxilia na configuração dos componentes de calibração automática. Inicialmente, foi necessário preparar o componente que calcula as eficiências (Figura 27), informando a série de dados que seria utilizada durante a calibração (orun.dat), qual o contexto que contém os componentes que foram considerados na calibração (TimeLoop), qual a propriedade simulada (catchmentSimRunoff_qm), qual a propriedade medida (catchmentObsRunoff) e qual o atributo de tempo (J2K.time). Também é importante definir o período de calibração, na aba *Time Filters*, caso contrário, o modelo calibraria considerando todo o período de execução.

Figura 27 – Janela de configurações do componente de eficiências do modelo

Fonte: Autor.

Finalmente, foram configurados os parâmetros que seriam otimizados, quais as funções objetivo que foram consideradas e qual o algoritmo de busca que deveria ser executado (Figura 28). Neste caso, as funções objetivo foram os testes estatísticos já apresentados: NSE, PBIAS e R^2 , em suas versões normalizadas, ou seja, variando de 0 a 1, em que 0 é o pior caso e 1 o melhor (SUAREZ et al., 2018), sendo o algoritmo de busca responsável por procurar o conjunto de parâmetros com os menores valores dos coeficientes normalizados. O algoritmo de busca escolhido para ser utilizado foi o NSGA-II (TANG et al., 2006), e as propriedades configuradas para ele encontram-se na Tabela 6.

Figura 28 – Configuração do otimizador

NSGA2

NSGA2

List of files excluded during parallelization: *.*\dat\.*,.*\cdat\.*,.*\log

probability for crossover: 0.9

distribution index for mutation: 20.0

probability for mutations: 1.0

maximum number of iterations: 2000.0

Parameter configuration

selected	Name	Component	Lower bound	Upper bound	start value
☒	InitGroundWater__initRG1	optimizer	0	1	0.96
☒	InitGroundWater__initRG2	optimizer	0	1	0.1
☒	InitSoilWater__ACAdaptation	optimizer	0	5	1.5
☒	InitSoilWater__FCAdaptation	optimizer	0	5	4.7
☒	J2KProcessGroundwater__gwRG1Fact	optimizer	0	10	10
☒	J2KProcessGroundwater__gwRG1RG2dist	optimizer	0	1	0.95
☒	J2KProcessGroundwater__gwRG2Fact	optimizer	0	10	1.2
☒	J2KProcessLumpedSoilWater__soilConcRD1	optimizer	0	10	1
☒	J2KProcessLumpedSoilWater__soilConcRD2	optimizer	0	10	10
☒	J2KProcessLumpedSoilWater__soilDiffMPSLPS	optimizer	0	10	0.25
☒	J2KProcessLumpedSoilWater__soilDistMPSLPS	optimizer	0	10	0.28
☒	J2KProcessLumpedSoilWater__soilAtVerLPS	optimizer	0	10	0.8
☒	J2KProcessLumpedSoilWater__soilMaxInfSummer	optimizer	0	200	150
☒	J2KProcessLumpedSoilWater__soilMaxInfWinter	optimizer	0	200	200

Objective configuration

selected	Name	Component
☐	eff_ave_normalized	J2K
☒	J2K_eff_bias_normalized	optimizer
☐	eff_le1_normalized	J2K
☐	eff_le2_normalized	J2K
☒	J2K_eff_r2_normalized	optimizer
☐	J2K_eff_e1_normalized	optimizer
☒	J2K_eff_e2_normalized	optimizer

OK Cancel

Fonte: Autor.

Tabela 6 – Propriedades do algoritmo NSGA-II

Propriedade	Valor
Probabilidade de cruzamento (%)	90, 70 e 50
Índice de distribuição para mutação	20
Probabilidade de mutações (%)	100
Número máximo de iterações	2000
Número de <i>threads</i> de processamento	30
Tamanho da população	30
Número máximo de gerações	1000
Índice de distribuição para cruzamento	20
Execução paralela?	Sim

Fonte: Autor.

3.4.4 Parametrização do modelo

Os parâmetros hidrogeológicos não-calibráveis do modelo devem estar em pasta adequada e salvos no formato .par (Figura 29).

Figura 29 – Localização dos arquivos de parâmetros não calibráveis

Mestrado > Modelo definitivo > Modelos_Pos_Corr_Solo > Modelo 2017_30m > parameter >

Name	Date modified	Type	Size
backup	7/24/2018 3:10 PM	File folder	
hgeo	3/24/2018 6:07 PM	PAR File	1 KB
hrus	3/23/2018 4:21 PM	PAR File	75 KB
landuse	3/21/2018 2:54 PM	PAR File	2 KB
landuse_right	4/18/2018 10:20 AM	PAR File	2 KB
reach	3/15/2018 5:18 PM	PAR File	2 KB
soils	3/20/2018 10:54 AM	PAR File	42 KB

Fonte: Autor.

3.4.4.1 Parâmetros hidrogeológicos

O arquivo de parâmetros hidrogeológicos (Figura 30) contém as propriedades inerentes aos compartimentos subterrâneos da bacia do Ribeirão da Onça. Nesse caso, RG1 representa a camada mais superficial, pouco salinizada, enquanto RG2 representa a camada subjacente, formada pelos arenitos Botucatu e Pirambóia, que representam o Sistema Aquífero Guarani (WENDLAND et al., 2004). Os dados de armazenamento máximo (RG_max) e dos coeficientes de armazenamento (RG_k) foram obtidos de Machado (2012).

A coluna GID contém o número identificador da formação geológica representada, sendo: 1 – Botucatu; 3 – Depósitos colúvio-eluvionares; 4 – Pirambóia; 5 – Depósitos aluvionares.

Figura 30 – Planilha hgeo.par

	A	B	C	D	E	F
1	#hgeo.par					
2	GID	RG1_max	RG2_max	RG1_k	RG2_k	RG1_active
3	1	0	0	0	0	0
4	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	1
5	n/a	mm	mm	d	d	n/a
6	5	170	2000	20	197	1
7	3	150	2000	10	200	0
8	1	187	1900	15	220	0
9	4	150	2000	10	200	0
10	#end of hydrogeo.par					

Fonte: Autor.

3.4.4.2 Parâmetros do solo

Os solos da BRO, em alguns pontos, são muito profundos, chegando a 100 m para atingir

a rocha mãe, conforme evidenciado por Guanabara (2011), com profundidades variando de 0 a 100 metros dentro de seus limites. Como considerou-se que em toda a extensão da bacia há apenas um tipo de solo (Neossolo-Quartzarênico), foi necessário adaptar o arquivo de parâmetros (Figura 31) para, no lugar de os identificadores representarem classes de solo, representarem valores médios das classes de profundidades. Os valores de kf_{min} e kf_{max} (condutividade hidráulica máxima e mínima) não possuem relevância dentro do modelo pois não são utilizados em nenhum módulo do J2K. A Tabela 7 contém as descrições dos parâmetros de solo. Os parâmetros de solo foram extraídos de Machado (2012).

Tabela 7 – Parâmetros de solo

Parâmetro	Descrição
h e depth_min	Profundidade do solo (cm e m)
aircap	Capacidade de ar (mm)
fc_sum	Soma da capacidade de solo na coluna do solo (mm)
fc_n	Capacidade de solo em função da profundidade ($mm.dm^{-1}$)

Fonte: Autor.

Figura 31 – Planilha soils.par

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	# soils parameters														
2	SID	h	kf_min	depth_mi	kf_max	cap_rise	aircap	fc_sum	fc_1	fc_2	fc_3	fc_4	fc_5	fc_6	fc_7
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	1	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999
5	n/a	cm	m/d	m	m/d	0/1	mm	mm	mm/dm	mm/dm	mm/dm	mm/dm	mm/dm	mm/dm	mm/dm
6	1	210	0.13	2	0.47	1	252	488	27	24	23	23	23	23	23
7	2	430	0.13	5	0.47	0	516	990	24	23	23	23	23	23	23
8	3	1500	0.13	15	0.47	0	1800	3451	24	23	23	23	23	23	23
9	4	2500	0.13	25	0.47	0	3000	5773	23	23	23	23	23	23	23
10	5	3510	0.13	35	0.47	0	4212	8074	24	23	23	23	23	23	23
11	6	4500	0.13	45	0.47	0	5400	10350	23	23	23	23	23	23	23
12	7	6000	0.13	60	0.47	0	7200	13823	23	23	23	23	23	23	23
13	8	10000	0.13	100	0.47	0	12000	23000	23	23	23	23	23	23	23
14	#end of soils.par														

Fonte: Autor.

3.4.4.3 Parâmetros de uso do solo e cobertura vegetal

Os parâmetros de uso do solo e cobertura vegetal são importantes por sua relação com a taxa de evapotranspiração. Uma revisão bibliográfica extensa foi realizada para se definir os valores de resistência superficial ao vapor (RSC_0) de cada classe de uso do solo em função do mês do ano, tendo em vista que os valores definidos por Machado (2012), apesar de recomendados pela FAO (1956), não refletiam as variações intra-anuais do déficit de água do solo (RUSSEL et al., 1980), propriedade de considerável efeito nesse parâmetro. Os demais parâmetros estão expostos na Figura 32 e foram extraídos de Kunne et al. (2018). LAI é o índice

de área foliar, effHeight é a altura efetiva da vegetação e rootDepth a profundidade média das raízes.

Tabela 8 – Resistência superficial ao vapor de água para cada mês do ano juliano

Uso do solo	Capi m ¹	Soja 2	Can a ²	Pasto 3	Solo exposto ⁴	Citro s ⁴	Mata 5	Eucalipt o ⁴
RSC0_1	55	60	55	45	20	55	40	50
RSC0_2	55	60	55	45	20	55	40	55
RSC0_3	60	65	60	50	20	60	50	70
RSC0_4	75	70	75	60	20	75	70	80
RSC0_5	80	75	80	80	20	80	90	80
RSC0_6	80	80	80	80	20	80	100	80
RSC0_7	80	85	80	80	20	80	110	80
RSC0_8	80	75	80	80	20	80	100	70
RSC0_9	70	70	70	70	20	70	95	60
RSC0_10	65	65	65	60	20	65	75	55
RSC0_11	55	65	55	40	20	55	60	50
RSC0_12	55	60	55	45	20	55	40	50

1. FAO (1956); 2. Luchiari et al. (1991), Harmsen et al. (2006); 3. Russel et al. (1980); 4. Kunne et al. (2018); 5. Schellekens et al. (2000)

Fonte: Organizado pelo autor.

Figura 32 – Planilha landuse.par

#Parameter File created: 05/04/2017														
LID	albedo	RSC0_1		RSC0_12	LAI_d1	LAI_d2	LAI_d3	LAI_d4	effHeight	effHeight	effHeight	effHeight	rootDepth	sealedGra
1	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-9999	100	1000		1000	100	100	100	100	50	50	50	50	50	1
n/a	%	s/m		s/m	n/a	n/a	n/a	n/a	m	m	m	m	dm	n/a
8	0.23	55		55	2	2	2	2	1.2	1.2	1.2	1.2	10	0
6	0.24	60		60	8	7	7	8	1.2	1.2	1.2	1.2	20	0
3	0.2	55		55	8	6	6	8	2	2	2	2	20	0
4	0.25	45		45	3	3	3	3	0.5	0.5	0.5	0.5	6	0
1	0.05	20		20	1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0
5	0.15	55		55	8	8	8	8	4	4	4	4	12	0
2	0.2	47.5		47.5	8	8	8	8	20	20	20	20	120	0
7	0.15	50		50	6	4	4	6	35	35	35	35	63	0
# end of landuse.par														

Fonte: Autor.

3.4.4.4 Parâmetros das URHs e canais fluviais

Os arquivos de parâmetros das URHs e canais fluviais são produtos do processo de discretização de URHs. A princípio, não é necessário realizar nenhuma mudança nos arquivos hrus.par (Figura 34) e reach.par (Figura 35), contudo, estes costumam conter erros relativos aos

identificadores das URHs e seus exutórios (para o hrus.par) ou dos canais fluviais e o canal a jusante (no caso do reach.par), principalmente quando há conflito de informações, como quando, por exemplo, há um vértice de um trecho do rio muito próximo (ou colinear) à aresta de um polígono de URH. Para identificação e correção desses erros, realizou-se análise dos arquivos *shapefile* (Figura 33) que também advêm da discretização. A tabela de atributos desses arquivos contém informações análogas às dos arquivos de parâmetros. Dessa forma, é possível identificar os polígonos e qual sua origem/exutório/jusante correta.

O arquivo hrus.par contém informações sobre cada polígono de URH, sobretudo acerca de: área, elevação, declividade, aspecto, coordenada UTM x, coordenada UTM y, identificação dos elementos dos mapas sobrepostos (uso do solo, geologia e solo), URH receptora e canal fluvial receptor do escoamento.

O arquivo reach.par possui informações sobre a identificação do canal fluvial receptor do escoamento, comprimento, declividade, sinuosidade, rugosidade e largura dos canais.

Figura 33 – Verificando a tabela de atributos dos arquivos *shapefile*

Fonte: Autor.

Figura 34 – Planilha hrus.par

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	# hru.par	27 Feb 2018	17:02:30 by GRASS-HRU											
2	ID	area	elevation	slope	aspect	x	y	watershed	subbasin	landuseID	soilID	hgeoID	to_poly	to_reach
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	999999	9999999	10000	90	360	9999999	9999999	999999	999999	9999	9999	9999	999999	999999
5	n/a	m2	m	deg	deg	m	m	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
6	1	31500	768	2.678	344	191886.9723	7546796.651	1	42	5	5	3	11	0
7	2	27900	783	2.098	359	191330.3748	7546703.885	1	42	5	6	3	3	0
8	3	40500	778	2.53	6	191531.3683	7546672.963	1	42	5	5	3	4	0
9	4	58500	773	2.492	339	191670.5177	7546549.274	1	42	5	5	3	13	0
10	5	32400	751	2.671	7	192690.9464	7546611.119	1	42	5	3	3	15	0
11	6	42300	796	2.098	346	191021.154	7546425.586	1	42	5	7	3	12	0
12	7	27900	791	2.354	345	191160.3034	7546611.119	1	42	5	7	3	8	0
13	8	70200	781	2.486	347	191376.7579	7546580.196	1	42	5	6	3	13	0
14	9	47700	801	2.018	357	190882.0046	7546456.508	1	42	5	7	3	6	0
15	10	28800	762	2.043	353	191979.7385	7546332.82	1	42	5	4	3	16	0
16	11	74700	762	2.12	320	192134.3489	7546611.119	1	42	5	4	3	24	0
17	12	35100	791	3.818	346	191129.3813	7546240.054	1	42	5	7	3	18	0
18	13	55800	769	2.085	347	191685.9787	7546425.586	1	42	5	5	3	34	0

Fonte: Autor.

Figura 35 – Planilha reach.par

	A	B	C	D	E	F	G
1	# reach.par	27 Feb 20	16:04:41 by GRASS-HRU				
2	ID	to-reach	length	slope	sinuosity	rough	width
3	0	0	0	0	1	0	0
4	999999	999999	99999	90	9999	9999	
5	n/a	n/a	m	%	n/a	n/a	m
6	36	0	1243	0.4827	1.17	30	1
7	38	36	1331	0.6011	1.18	30	1
8	40	38	1442	1.1096	1.1	30	1
9	42	40	1712	2.3949	1.27	30	1
10	44	40	574	0.8711	1.04	30	1
11	46	44	1540	2.7273	1.13	30	1
12	48	44	1544	1.4249	1.13	30	1
13	50	48	44	0.1001	1	30	1
14	52	48	75	5.3333	1.08	30	1
15	54	38	1145	0.6987	1.18	30	1

Fonte: Autor.

3.5 Adequação dos dados de vazão e climatológicos

Previamente à criação do arquivo orun.dat, o qual é utilizado como entrada dos dados de vazão no modelo, foi necessário verificar se havia inconsistências nas medições realizadas. Diversos estudos enfatizam a importância dos dados de entrada em modelos hidrológicos distribuídos (OUDIN et al., 2006; CHANG et al., 2017; PECHLIVANIDIS et al., 2017). Para tanto, elaborou-se em Python (Figura 36) um programa capaz de ler os dados de vazão e chuva e compará-los entre si, sendo importante haver uma boa correlação, como por exemplo entre os dados de precipitação do CRHEA e a vazão do ADCP. A última versão do programa foi denominada Core Alpha 6, ou CA6 e seu código encontra-se no Apêndice C.

Figura 36 – Programa Core Alpha 6 (CA6)

Choose one as the first CSV

First CSV

Runoff:

☒ Pressure transducer

☐ ADCP

☐ Current meter

☐ Pressure transducer with damming periods replaced by Current meter

☐ Pressure transducer and ADCP with damming replaced by Current Meter

☐ Pressure transducer no dam (new coefficients)

☐ Upstream Parshall flume

☐ Downstream Parshall flume

Rain:

☐ CRHEA

☐ CRHEA delayed one day

☐ Monte Alegre

☐ ANA

☐ Santo Ignacio de Loyola

☐ Santo Ignacio de Loyola 2

Load custom CSV #1

☐ Rainfall? (Leave unchecked if runoff)

Choose one as the second CSV

Second CSV

Runoff:

☐ Pressure transducer

☐ ADCP

☒ Current meter

☐ Pressure transducer with damming periods replaced by Current meter

☐ Pressure transducer with damming replaced by no data

☐ Pressure transducer no dam (new coefficients)

☐ Upstream Parshall flume

☐ Downstream Parshall flume

Rain:

☐ CRHEA

☐ CRHEA delayed one day

☐ Monte Alegre

☐ ANA

☐ Santo Ignacio de Loyola

☐ Santo Ignacio de Loyola 2

Load custom CSV #2

☐ Rainfall? (Leave unchecked if runoff)

01/01/2000

31/12/2017

Pearson and 2-tailed p test

Pearson time series and gradient

Time series (Only the first CSV)

Comparative time series

Scatter chart

Pearson: 0.491624158814

2-tailed p test: 3.69111414818e-12

Fonte: Autor.

O programa permite verificar a correlação entre duas séries temporais através do coeficiente de correlação de Pearson (R^2) e o teste p bicaudal de significância (Figura 36). Além disso, para identificação de incongruências (por exemplo, ativação da barragem em data não anotada), o programa é capaz de elaborar um gráfico com a variação de R^2 em função do tempo (*Pearson time series and gradient*) juntamente com o gradiente dessa correlação (dR^2/dt) (Figura 37).

Figura 37 – R^2 em função do tempo e gradiente

Fonte: Autor.

Adicionalmente, pode-se confeccionar gráficos das séries temporais individuais (Figura 38) ou comparativos, seja com duas séries de chuva, duas de vazão ou uma de cada (Figura 39), para visualização das discrepâncias entre as séries. Finalmente, é possível também plotar um gráfico de dispersão já com uma regressão ajustada e sua respectiva equação (Figura 40).

Figura 38 – Série temporal individual

Fonte: Autor.

Figura 39 – Série temporal comparativa

Fonte: Autor.

Figura 40 – Gráfico de dispersão

Fonte: Autor.

O CA6 permite que seja mudado o intervalo de tempo considerado na elaboração dos gráficos e cálculos das correlações, além de ser possível carregar arquivos personalizados (*Load Custom CSV*), desde que o programa seja notificado se é um arquivo de precipitação ou vazão e estes estejam conforme o modelo da Figura 41.

Figura 41 – Exemplo de como os arquivos .csv devem estar para serem lidos pelo CA6

	A	B	C	D
1	01/01/2000	18.1		
2	02/01/2000	3.8		
3	03/01/2000	66.8		
4	04/01/2000	3.8		
5	05/01/2000	7.4		
6	06/01/2000	1.4		
7	07/01/2000	0.1		
8	08/01/2000	9.2		
9	09/01/2000	-9999	(Ausência de dados)	
10	10/01/2000	0		
11	11/01/2000	0		
12	12/01/2000	0		
13	13/01/2000	0.7		
14	14/01/2000	0.2		
15	15/01/2000	8		
16	16/01/2000	2.8		
17	17/01/2000	2.5		

Fonte: Autor.

Todos os recursos do CA6 foram utilizados com a finalidade de se adequar os dados climatológicos e hidrológicos que suplementam o modelo, desde a remoção de dados inadequados, correção, ou identificação de falhas tipográficas (especialmente nos dados do CRHEA).

3.6 Calibração

Os modelos foram calibrados individualmente pelo módulo OPTAS do JAMS, utilizando o algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II*), conforme já mencionado, e, ao término das iterações, um programa elaborado em Python (Anexo B) permitiu a visualização agrupada dos resultados e auxiliou na busca por um conjunto ótimo de parâmetros que melhor representasse todos os modelos. Os períodos de aquecimento e calibração para cada modelo estão representados na Tabela 9. A metodologia de calibração e validação aplicada neste trabalho foi adaptada de Wagner et al. (2017), em que um estudo comparando os efeitos de representações estáticas de alterações do uso do solo contra representações dinâmicas foi realizado, utilizando-se o modelo SWAT.

Tabela 9 – Períodos de aquecimento e calibração dos modelos

Ano do modelo	Período de aquecimento	Período de calibração
2008	Jan/2005 – Dez/2007	Jan/2008 – Dez/2009
2011	Jan/2008 – Dez/2010	Jan/2011 – Dez/2012
2013	Jan/2010 – Dez/2012	Jan/2013 – Dez/2014
2015	Jan/2012 – Dez/2014	Jan/2015 – Dez/2016

Fonte: Autor.

Cada modelo foi calibrado seis vezes, sendo que, a cada duas calibrações, a probabilidade de cruzamento era alterada (90, 70 e 50%) para ampliar o número de ótimos encontrados (YIJIE; GONGZHANG, 2008). Os parâmetros de calibração utilizados foram selecionados com base na análise de sensibilidade de Machado (2012) que elencou quais os parâmetros cuja variação produz efeito na resposta hidrológica do modelo. Dessa forma, os valores iniciais dos parâmetros originaram-se dos ótimos encontrados pela autora (Tabela 10).

Tabela 10 – Valores máximos, mínimos e iniciais dos parâmetros calibrados

Parâmetro	Valor inicial	Mínimo	Máximo
initRG1	0,96	0	1
initRG2	0,10	0	1
ACAdaptation	1,5	0	5
FCAdaptation	4,7	0	5
soilPolRed	0	0	10
gwRG1Fact	10	0	10
gwRG1RG2dist	0,95	0	1
gwRG2Fact	1,2	0	10
soilConcRD1	1	0	10
soilConcRD2	10	0	10
soilDiffMPSLPS	0,25	0	10
soilDistMPSLPS	0,28	0	10
soilLatVertLPS	0,8	0	10
soilMaxInfSummer	150	0	200
soilMaxInfWinter	200	0	200
soilMaxPerc	20	0	20
soilOutLPS	0,06	0	10
flowRouteTA	12	0	100

Fonte: Autor.

Devido ao número de parâmetros considerados e por terem sido usados três testes estatísticos como funções objetivo, o OPTAS exigiu uma grande quantidade de processamento e armazenamento para sua operação. Sendo assim, foi necessário acessar-se remotamente o *cluster* de computadores da Universidade de Jena para calibração dos modelos. Ao final de cada calibração, um arquivo .dat foi gerado, contendo os parâmetros de cada iteração e suas respectivas métricas estatísticas (NSE, PBIAS e R^2 normalizados).

3.7 Otimização global

Foram realizadas, ao todo, 24 calibrações, gerando um total de 48 mil conjuntos de parâmetros. Com o intuito de se agrupar os melhores conjuntos, elaborou-se um outro programa em Python, denominado GOptimal 4 (GO4, Figura 42), o qual ordena os arquivos .dat em termos do NSE e permite a visualização dos dados ordenados, separados por parâmetro. Além disso, utilizando o método de estimativa da densidade de probabilidade *Kernel Density Estimator* (KDE) (SPENCER et al., 2017), o programa permite elaborar um gráfico violino para melhor visualização da distribuição dos parâmetros em função da eficiência de Nash-Sutcliffe.

Figura 42 – Goptimal 4 (GO4)

Fonte: Autor.

Para utilizar o GO4, é necessário que os arquivos .dat da otimização estejam nomeados da seguinte forma: AAAA_n, em que AAAA é o ano do modelo e n um número de 1 a 6 representando a calibração. Os arquivos devem, então, ser arrastados até o botão “*Drag the set of optimizer files here or click to browse for them*”. É possível pressionar o botão “*Display file names*” para visualizar quais arquivos foram carregados, ou, ao pressionar “*Change number of candidates*” pode-se diminuir o número de conjuntos de parâmetros considerados por modelo (o valor padrão é 2000). Ao clicar em “*Execute*”, os arquivos são lidos, convertidos em listas, ordenados e agrupados em parâmetros. Por fim, as opções “*Display scatter chart*” (exibir gráfico de dispersão) e “*Display violin plot*” (exibir gráfico violino) surgem.

Os gráficos de dispersão e violinos auxiliaram na redução da amplitude dos parâmetros ótimos para uma posterior busca manual de qual conjunto seria capaz de produzir métricas estatísticas boas para todos os modelos. A interpretação dos gráficos de dispersão e violino ocorreu conforme as seguintes etapas:

- (i) Visualiza-se o comportamento individual dos parâmetros em cada calibração no gráfico de dispersão (Apêndice E, Figura 72);
- (ii) Verifica-se se há tendências de agrupamentos dos parâmetros em torno de algum valor comparando-se execuções de modelos distintos;
- (iii) Observa-se o valor da mediana no gráfico violino (Apêndice F, Figura 73) e a conformação da função de densidade de probabilidade;
- (iv) Caso a função de densidade de probabilidade tenha formato de cálice, significa que há tendência de agrupamento em um valor específico, caso contrário, deve-se considerar que existem múltiplas possibilidades de redução da amplitude de variação dos parâmetros;
- (v) Nos casos em que não há tendência específica, utiliza-se a mediana do gráfico violino como referência, em conjunto com os parâmetros candidatos da Tabela 19 para redução da amplitude de variação.

3.8 Validação

A validação não foi realizada individualmente para cada modelo, mas com um novo modelo, o representativo do ano de 2017. Este modelo foi produzido com o mapa de uso do solo de janeiro de 2017. O conjunto de parâmetros ótimo encontrado na otimização global foi testado executando-se o modelo de 2017 com período de aquecimento de 01/01/2013 até

31/12/2015, e período a ser considerado na validação de 01/01/2016 até 31/12/2017. As métricas estatísticas foram então verificadas e comparadas com as recomendações de Moriasi et al. (2008).

3.9 Aplicação do modelo

3.9.1 Cenários hipotéticos

Uma das aplicações propostas é a predição de cenários hipotéticos, com dados climatológicos conhecidos. Existem diversos estudos no contexto de se aplicar modelos hidrológicos calibrados na avaliação de potenciais impactos no regime hidrológico (CHEN et al., 2011; RASMUSSEN et al., 2012; TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012). Nesse sentido, elaborou-se mais quatro modelos (Tabela 11) em que houve a transposição dos dados climáticos de 2011-2013 (anos chuvosos) e 2013-2015 (anos de estiagem). A escolha dos anos foi feita com base na precipitação anual registrada no CRHEA (Figura 43).

Figura 43 – Precipitação anual medida na estação climatológica do CRHEA

Fonte: Autor.

Ademais, foram confeccionados dois novos mapas de uso do solo hipotéticos (Figura 44) para discretização das novas URHs dos cenários. Um cenário em que todas as áreas onde há cultivo de eucalipto estariam em pleno uso, e um cenário em que todos os eucaliptos da bacia estariam removidos (solo exposto).

Tabela 11 – Modelos dos cenários hipotéticos

Denominação do modelo	Sigla
Modelo chuvoso/eucalipto	MCE
Modelo chuvoso/solo exposto	MCS
Modelo seco/eucalipto	MSE
Modelo seco/solo exposto	MSS

Fonte: Autor.

Figura 44 – Cenários hipotéticos de uso e ocupação do solo. Cenário 1: Eucalipto; Cenário 2: Solo exposto

Fonte: Autor.

3.9.2 Setorização do modelo

Outra aplicação explorada do modelo é na sua setorização para verificar o escoamento em partes diferentes da bacia. Rosa (2018) instalou e validou duas calhas Parshall na bacia, com equipamentos automáticos de medição de nível e posterior processamento dos dados para conversão em vazão. As calhas estão localizadas em dois pontos a montante da seção de medição de vazão, estando a Calha 1 a 4 km e a Calha 2 a 2,7 km de distância da estação fluviométrica pelo leito do rio (Figura 45).

Figura 45 – Localização das calhas Parshall na BRO

Fonte: Rosa (2018).

A setorização apenas envolve a preparação de novos mapas de URH, visto que as demais configurações podem derivar do modelo de 2017, inclusive os dados de entrada. Os parâmetros utilizados para verificação da capacidade de setorização do modelo foram aqueles encontrados na otimização global.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Mapas de uso e ocupação do solo

A evolução dos usos do solo na bacia está apresentada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e os mapas de uso do solo da BRO (Figura 46) foram elaborados baseados nos limites da área que drena para a estação fluviométrica.

Tabela 12 – Evolução do uso do solo na BRO

Ano Classe	2008 (km²)	Variação (%)	2011 (km²)	Variação (%)	2013 (km²)	Variação (%)	2015 (km²)	Variação (%)	2017 (km²)
Cana	0,00	-	0,13	165,28	0,35	1,31	0,35	1,18	0,36
Capim	0,26	-46,48	0,14	7,36	0,15	-0,41	0,15	-0,60	0,15
Citros	17,59	0,83	17,73	87,55	32,97	2,21	33,70	-6,13	31,63
Eucalipto	31,44	11,31	32,77	14,47	37,51	-25,73	27,86	25,62	35,00
Mata	6,03	10,02	6,63	22,17	8,10	1,16	8,20	-3,22	7,93
Pasto	7,20	-11,22	7,28	-30,96	5,68	-8,50	5,19	6,08	5,51
Soja	7,88	4,37	8,22	-100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Solo exposto	30,62	-11,50	27,10	-43,73	15,25	61,05	25,55	-20,88	19,43

Fonte: Autor.

Fonte: Autor.

Observa-se que as variações nos polígonos de eucalipto correspondem aos períodos de entressafra e colheita da cultura. Ademais, a cultura de soja a noroeste da bacia deixou de estar presente a partir de 2013, sendo substituída integralmente por citros.

Apesar da variação expressiva na presença de cana-de-açúcar entre 2011 e 2013 (165,28%), esta cultura apenas representa uma pequena faixa a nordeste da bacia, próxima ao exutório.

A intermitência nas variações de áreas ocupadas por solo exposto é inerente às entressafras das culturas de eucalipto.

A redução na área de pasto de 2011 a 2013 representa a substituição de parte da área de pastagem na Fazenda Monte Alegre por eucalipto.

4.2 Unidades de resposta hidrológica (URHs)

A discretização da bacia do Ribeirão da Onça em URHs foi realizada pelo HRUweb (Apêndice B, Figura 65 e Figura 71). No total, foram elaborados 5 mapas de URHs (Figura 47), os quais diferenciam-se em relação aos mapas de uso do solo, específicos para cada ano. Dessa forma, o número de URHs não varia muito entre os mapas gerados (Tabela 13), sendo as maiores diferenças encontradas nos limites e formas dos polígonos.

Figura 47 – Discretização da bacia do Ribeirão da Onça em URHs

Fonte: Autor.

Tabela 13 – Número de URHs por modelo

Modelo	Número de URHs
2008	1174
2011	1177
2013	1174
2015	1175
2017	1167

Fonte: Autor.

4.3 Adequação dos dados de entrada

Por meio do programa CA6, foi possível identificar que o linígrafo (transdutor de

pressão) encontrava-se descalibrado, verificado pelo desvio crescente da vazão calculada com os dados do transdutor de pressão em relação ao molinete hidrométrico (Figura 48).

Figura 48 – Gráfico comparativo das vazões do transdutor de pressão e do molinete

Fonte: Autor.

Para corrigir esse erro, recorreu-se às anotações quinzenais da altura da régua limnimétrica cuja cota referencial é a mesma que a do linígrafo. Observou-se que era possível dividir os desvios em três períodos (Figura 49). Por fim, ajustou-se uma reta de regressão para cada seção, com a finalidade de se criar um novo nível do linígrafo que melhor correspondesse às alturas da régua.

Figura 49 – Correção das alturas do linígrafo

Fonte: Autor.

Para correção dos dados do linígrafo nos períodos de barramento (épocas de estiagem) foi necessário verificar as anotações feitas durante os 10 anos de monitoramento. Como todos os responsáveis pelo monitoramento da BRO são instruídos a anotar eventuais alterações que possam afetar de alguma maneira as medições de vazão, foram verificados os registros antigos de monitoramento. Observou-se que em alguns anos não houve registros de represamento (Tabela 14).

Tabela 14 – Períodos de represamento registrados na seção de medição de vazão da BRO

Quando foi represado	Quando a barragem foi removida
15/08/2008	10/10/2008
05/11/2008	07/11/2008
30/08/2009	05/10/2009
02/09/2010	23/11/2010
16/08/2012	18/12/2012
07/06/2013	28/08/2013
22/05/2014	18/12/2014
09/08/2016	24/11/2016
07/06/2017	19/12/2017

Fonte: Autor.

Com os resultados da análise do gradiente da correlação linear entre o transdutor de

pressão e a precipitação fornecida pelo CRHEA (Figura 50), puderam ser preenchidos os períodos sem registro do represamento.

Figura 50 – Gradiente da correlação linear em função do tempo entre o linígrafo e a precipitação do CRHEA. Os períodos de barramento não registrados nas anotações de campo estão indicados nos quadros vermelhos

Fonte: Autor.

Os períodos que necessitaram de correção foram de 08/07/2012 a 05/12/2012 e 15/08/2015 a 21/11/2015. Pelas análises também se verificou qual equipamento medidor de vazão fornecia dados de maior acurácia, visto que os arquivos .dat devem conter dados de vazão de apenas uma fonte. Dessa forma, comparou-se seus valores de R^2 e testes p bicaudais em relação à precipitação fornecida pelo CRHEA (Tabela 15). Durante esta análise, observou-se que o transdutor de pressão fornecia os melhores dados, seguido do molinete hidrométrico e do ADCP. Logo, optou-se por utilizar os dados do transdutor sempre que possível, e nos períodos de barramento estes são substituídos pelos dados do ADCP quando não há dados do molinete.

Tabela 15 – Comparação dos valores de R^2 e testes p bicaudais entre os equipamentos medidores de vazão em relação à precipitação fornecida pelo CRHEA

Equipamento(s)	R^2	Teste p bicaudal
Transdutor de pressão	0,54	$2,9 \cdot 10^{-231}$
ADCP	0,33	$1,20 \cdot 10^{-23}$
Molinete hidrométrico	0,39	$8,51 \cdot 10^{-12}$
Transdutor de pressão, molinete e ADCP (TMA)	0,58	$2,90 \cdot 10^{-228}$
Calha 1	0,59	$3,08 \cdot 10^{-21}$
Calha 2	0,68	$6,44 \cdot 10^{-30}$

Fonte: Autor.

Também foram verificadas as correlações entre os dados de vazão dos métodos aplicados na BRO (Tabela 16).

Tabela 16 – Correlação (R^2) entre os dados de vazão de todos os métodos utilizados na BRO

Método	TMA	ADCP	Molinete	Calha montante	Calha jusante
TMA	-	X	X	X	X
ADCP	0,28	-	X	X	X
Molinete	0,69	0,39	-	X	X
Calha 1	0,82	0,77	0,83	-	X
Calha 2	0,82	0,82	0,90	0,88	-

Fonte: Autor.

A importância de possuir uma quantidade grande de dados foi verificada por Alcântara et al. (2017), os quais observaram a dificuldade inerente em calibrar modelos de discretização temporal diária com dados quinzenais.

Os dados de precipitação fornecidos pelas 4 estações também tiveram suas correlações verificadas (Tabela 17 e Figura 51).

Tabela 17 – Correlação (R^2) entre os dados de precipitação das quatro estações na BRO e localização dos gráficos de dispersão

Estação	CRHEA	Monte Alegre	ANA	Santo Ignácio
CRHEA	-	X	X	X
Monte Alegre	0,51 (Figura 51a)	-	X	X
ANA	0,73 (Figura 51b)	0,52 (Figura 51d)	-	X
Santo Ignácio	0,52 (Figura 51c)	*	0,54 (Figura 51e)	*

Fonte: Autor.

*As estações Monte Alegre e Santo Ignácio não possuem dados contemporâneos.

Figura 51 – Gráficos de dispersão dos dados de precipitação do CRHEA em função dos dados da Monte Alegre.
a) CRHEA (eixo x) e Monte Alegre (eixo y); b) CRHEA (eixo x) e ANA (eixo y); c) CRHEA (eixo x) e Santo Ignácio (eixo y); d) Monte Alegre (eixo x) e ANA (eixo y); e) Santo Ignácio (eixo x) e ANA (eixo y)

Fonte: Autor.

As estações ANA e CRHEA apresentaram a melhor correlação entre si, em contraste com o que foi verificado por Machado (2012), que observou que a melhor correlação advinha das medições do CRHEA com o P01 (Monte Alegre), e são as únicas estações que fornecem dados de precipitação por todo o período de execução dos modelos (de 2005 a 2018).

Além disso, nos dados da estação meteorológica do CRHEA foi necessário substituir os espaços vazios (ausência de dados) pelo valor -9999, que é interpretado pelo modelo como valor nulo (N/A). As falhas na série de dados de insolação e umidade relativa foram preenchidas através de interpolação linear, tendo em vista que o módulo da evapotranspiração não pode ser executado sem estes.

4.4 Calibração e validação

O gráfico de dispersão dos parâmetros encontra-se no Apêndice E (Figura 72). Nele, é possível perceber as tendências de alguns parâmetros a se aglomerarem próximo a certos valores, possibilitando a redução da amplitude de variação destes em uma calibração manual. Para uma análise mais profunda, o programa GO4 também exibe o *plot* violino dos parâmetros (Apêndice F, Figura 73), em que a função densidade de probabilidade (*Kernel Density Estimation*) converte a densidade populacional dos parâmetros em torno de um certo valor em um número que varia próximo a 1, em que 1 representa a ausência de parâmetros próximos àquele valor.

Além dos dois gráficos supracitados, também elaborou-se uma tabela (Tabela 18) contendo os valores de NSE para os melhores conjuntos de parâmetros em cada evento de calibração, com a qual é possível visualizar como esses conjuntos se comportaram quando utilizados em modelos de outros anos.

Os valores dos parâmetros dos modelos mais representativos (grifados em amarelo na Tabela 18) estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 18 – Coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe para os melhores conjuntos de parâmetros de cada modelo e como os modelos dos demais anos respondem a esses conjuntos

2008						
(% cruzamento)	90%	90%	70%	70%	50%	50%
(NSE)	0.52	0.48	0.43	0.32	0.50	0.56
2011	0.26	-1.18	0.25	-0.09	-0.07	-0.05
2013	-2.19	-2.55	-1.72	-1.19	-1.11	-1.6
2015	0.32	-0.38	0.2	0.48	0.52	0.24
2011						
(% cruzamento)	90%	90%	70%	70%	50%	50%
(NSE)	0.36	0.36	0.38	0.36	0.46	0.30
2008	0.25	0.3	0.15	-0.09	0.38	0.2
2013	-1.33	-2.58	-0.69	-0.03	-2.22	-1.35
2015	0.33	0.41	0.34	0.06	-0.11	0.3
2013						
(% cruzamento)	90%	90%	70%	70%	50%	50%
(NSE)	0.40	0.41	0.26	0.52	0.20	0.20
2008	-0.27	-1.5	-2.15	-0.77	-1.2	-0.8
2011	0.09	-0.52	-0.62	0.35	-0.28	0.08
2015	0.58	0.45	0.35	0.42	0.47	0.57
2015						
(% cruzamento)	90%	90%	70%	70%	50%	50%
(NSE)	0.64	0.62	0.63	0.67	0.66	0.62
2008	-0.11	0.08	0.29	0.23	0.04	-0.2
2011	-0.28	-0.28	-0.05	0.01	-0.08	-0.03
2013	-0.48	-0.77	-1.29	-1.01	-0.74	-0.65

Fonte: Autor.

Tabela 19 – Valores dos parâmetros mais representativos de cada modelo

Parâmetro	Ano_Probabilidade de cruzamento_Amostra					
	2008_90_1	2008_70_1	2011_90_1	2011_70_1	2011_50_2	2013_70_2
InitRG1	0,07	0,43	0,13	0,37	0,01	0,96
InitRG2	0,41	0,39	0,65	0,51	0,98	0,57
ACAdaptation	0,42	0,57	1,20	2,75	3,66	2,46
FCAdaptation	1,06	1,15	1,02	0,03	1,35	4,97
gwRG1Fact	8,24	8,97	8,16	5,97	4,99	7,81
gwRG1RG2dist	0,99	0,99	0,97	0,99	0,58	1,00
gwRG2Fact	0,97	0,78	0,50	0,71	0,92	0,99
soilConcRD1	6,61	3,86	5,87	5,94	0,00	3,53
soilConcRD2	2,86	2,95	4,74	1,16	0,72	7,83
soilDiffMPSLPS	9,29	3,08	3,61	1,25	0,00	6,73
soilDistMPSLPS	7,50	0,05	4,78	0,01	8,33	0,05
soilLatVertLPS	0,03	4,36	5,81	1,40	0,04	1,31
soilMaxInfSummer	156,38	132,05	20,49	19,45	51,90	36,14
soilMaxInfWinter	198,91	64,15	43,63	39,31	176,76	96,98
soilMaxPerc	19,90	19,45	14,83	17,36	13,98	18,16
soilOutLPS	6,79	2,67	1,41	1,82	1,99	0,13
soilPolRed	2,29	4,48	0,74	4,78	5,70	0,71
flowRouteTA	40,82	89,18	37,31	28,18	94,62	67,64

Fonte: Autor.

Estes valores, aliados aos gráficos de dispersão e violino embasaram a escolha de novos limites inferiores e superiores para uma nova busca manual por parâmetros que produzissem uma resposta hidrológica com NSE, PBIAS e R^2 razoáveis em todos os modelos (2008, 2011, 2013 e 2015). A Tabela 20 apresenta os novos limites e os parâmetros calibrados manualmente e a Tabela 21 apresenta os valores de NSE, PBIAS e R^2 em todos os modelos, inclusive as métricas estatísticas da validação (2017).

Tabela 20 – Novos limites inferiores e superiores e valor final calibrado

Parâmetro	Limite inferior	Limite superior	Calibrado
InitRG1	0,3	0,7	0,4
InitRG2	0,5	1	0,8
ACAdaptation	0	4	3,4
FCAdaptation	0	4	0,3
gwRG1Fact	4	9	7,7
gwRG1RG2dist	0	1	0,1
gwRG2Fact	0	5	4,5
soilConcRD1	1	6	2,2
soilConcRD2	2	8	4,4
soilDiffMPSLPS	0	6	0
soilDistMPSLPS	0	8	1,1
soilLatVertLPS	0	4	0,3
soilMaxInfSummer	10	110	54
soilMaxInfWinter	50	150	149
soilMaxPerc	0	20	17
soilOutLPS	0	5	3,7
soilPolRed	2	6	5,7
flowRouteTA	10	90	61

Fonte: Autor.

Durante a análise, observou-se uma anomalia no modelo de 2013, que não conseguiu produzir parâmetros compatíveis com os outros modelos. Isso pode ser devido às condições climáticas desse ano, em que houve a estiagem de 2013 até o final de 2014, exigindo parâmetros diferenciados. Dessa forma, por representar um caso particular, optou-se por considerar o modelo de 2013 como um *outlier*, descartando-o.

Tabela 21 – Valores de NSE, PBIAS e R^2 em todos os modelos, utilizando os parâmetros mais representativos

Modelo	NSE	PBIAS	R^2
2008	0,25	-0,74	0,56
2011	0,22	-8,16	0,51
2013	-	-	-
2015	0,39	-20,98	0,65
Validação (2017)	0,26	-1,78	0,45

Fonte: Autor.

Os valores de NSE se encontram abaixo do que é considerado satisfatório por Moriasi et al. (2008), contudo, os valores de PBIAS, em alguns casos (2008 e na validação de 2017), podem ser considerados ótimos. O que indica que o escoamento de base é simulado efetivamente, contudo, os picos de vazão nem sempre acompanham o que é observado.

A validação, apesar de apresentar NSE baixo, indica que o modelo é capaz de prever os efeitos das alterações do uso do solo no escoamento de base, tendo em vista que os valores de PBIAS e R^2 são satisfatórios.

Wagner et al. (2017) discutem as dificuldades na elaboração de um modelo representativo para bacias que sofrem mudanças rápidas no seu uso e ocupação do solo. Os autores apontam a necessidade de se monitorar continuamente as alterações no uso e ocupação do solo como sendo um pré-requisito para uma avaliação precisa dos impactos hidrológicos desses.

4.5 Escoamento simulado

A seguir, são apresentados os gráficos do escoamento superficial simulado (em vermelho), gerados com os parâmetros ótimos encontrados no tópico anterior, juntamente com o escoamento superficial observado (em azul) (Figuras 52 a 55).

Figura 52 – Escoamento superficial observado e simulado para o modelo de 2008

Fonte: Autor.

Figura 53 – Escoamento superficial observado e simulado para o modelo de 2011

Fonte: Autor.

Figura 54 – Escoamento superficial observado e simulado para o modelo de 2015

Fonte: Autor.

Figura 55 – Escoamento superficial observado e simulado para o modelo de 2017 (validação)

Fonte: Autor.

Os gráficos demonstram claramente a necessidade de se utilizar períodos de aquecimento durante a execução de modelos, pois fica evidente que nos três primeiros anos os compartimentos subterrâneos estão sendo preenchidos, e que apenas a partir do terceiro ano o escoamento simulado passa a corroborar com o observado. Cosgrove et al. (2003) classificam os períodos de aquecimento como parte essencial na execução de modelos hidrológicos.

Ademais, observa-se a inépcia do modelo em produzir picos de vazão correspondentes aos observados. Shahid et al. (2017) constataram que o NSE é um dos melhores indicadores de qualidade de modelos na predição da vazão de pico. Tendo em vista que todos os modelos, inclusive o modelo de validação, foram caracterizados como abaixo do satisfatório ($NSE < 0,50$) de acordo com Moriasi et al. (2008), há de se esperar que as vazões de pico não consigam ser adequadamente simuladas.

O modelo de 2015 produziu os piores resultados visualmente. O que indica que ainda existem áreas a serem trabalhadas para que haja uma melhor representatividade dos parâmetros encontrados. Diversos pesquisadores relatam as dificuldades inerentes à busca por parâmetros que efetivamente representem bacias em constante mudança das culturas presentes em sua área (CHU ET AL., 2010; LAMPARTER ET AL., 2016; WAGNER ET AL., 2016).

Por fim, é possível denotar que o escoamento simulado segue as tendências do escoamento observado, fato esse comprovado pelos valores satisfatórios de PBIAS (entre -50 e 50) e R^2 (superiores a 0,50, exceto na validação) (MORIASI et al., 2008).

4.6 Calibração local

Para promover uma comparação entre o desempenho de um modelo calibrado individualmente com enfoque em uma representatividade local de seus parâmetros, utilizou-se o modelo de 2015. Para tanto, posteriormente à calibração automática, realizou-se uma calibração manual, de modo a atingir um valor de NSE acima de 0,70. O período de calibração considerado foi de 01/01/2015 a 31/12/2016.

A Figura 56 apresenta o escoamento superficial simulado e o escoado para a calibração individual, e a Tabela 22 apresenta os parâmetros encontrados para essa calibração e as compara com as da calibração representativa enquanto a Tabela 23 apresenta as métricas estatísticas resultantes da calibração individual comparadas com as métricas da calibração representativa (global).

Figura 56 – Escoamento superficial observado e simulado para o modelo de 2015 com calibração individual
Runoff (overall)

Fonte: Autor.

Tabela 22 – Comparação entre os parâmetros calibrados manualmente para o modelo de 2015 e os encontrados para representatividade global

Parâmetro	Valor (2015 local)	Valor (global)
InitRG1	0,71	0,4
InitRG2	0,98	0,8
ACAdaptation	2,61	3,4
FCAdaptation	2,78	0,3
gwRG1Fact	5,92	7,7
gwRG1RG2dist	0,98	0,1
gwRG2Fact	1,64	4,5
soilConcRD1	3,09	2,2
soilConcRD2	7,12	4,4
soilDiffMPSLPS	2,09	0
soilDistMPSLPS	3,49	1.1
soilLatVertLPS	1,21	0.3
soilMaxInfSummer	55,50	54
soilMaxInfWinter	85,00	149
soilMaxPerc	15,97	17
soilOutLPS	2,17	3,7
soilPolRed	0,22	5,7
flowRouteTA	96,26	61

Fonte: Autor.

Tabela 23 – Valores de NSE, PBIAS e R^2 para o modelo de 2015 utilizando os parâmetros calibrados manualmente (locais) e representativos (globais)

Modelo	NSE	PBIAS	R^2
2015 (parâmetros locais)	0,71	-2,83	0,68
2015 (parâmetros globais)	0,39	-20,98	0,65

Fonte: Autor.

Também foi verificado os desempenhos dos parâmetros calibrados manualmente, quando aplicados nos modelos de outros anos (utilizando o mesmo período de calibração destes como a validação), apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Valores de NSE, PBIAS e R^2 dos modelos de 2008, 2011, 2013 e 2017 utilizando os parâmetros encontrados na calibração individual (local) de 2015.

Modelo	NSE	PBIAS	R^2
2008	0,22	-3,20	0,25
2011	0,01	-15,62	0,29
2013	-1,01	-35,55	0,42
2017	-0,93	-40,30	0,54

Fonte: Autor.

O modelo calibrado individualmente possui um bom desempenho para representação do período que compreende o período de calibração do modelo de 2015. Contudo, os parâmetros encontrados não podem ser utilizados em cenários de mudanças de uso do solo, evidenciado pelo fraco desempenho destes quando aplicados em modelos de outros anos.

A princípio, objetivava-se executar os modelos sequencialmente, com a finalidade de se obter uma parametrização global sem a necessidade de se calibrar os modelos individualmente, seguindo metodologia empregada no modelo SWAT por diversos autores (KLÖCKING; HABERTLANDT, 2002; MILLER ET AL., 2002; MANGO et al., 2011; BIEGER ET AL., 2015). No entanto, devido à uma limitação da API do framework JAMS e à dificuldade de se implementar no código uma forma de se integrar os volumes armazenados nos depósitos ao término de um período representado por um conjunto de URHs para dar início à representação de um conjunto de URHs subsequente (representação dinâmica de LUCC), optou-se pela calibração individual estática dos modelos, cada qual com seu conjunto de URHs e períodos de aquecimento próprios.

4.7 Cenários hipotéticos

Os cenários hipotéticos MSE (Modelo Seco/Eucalipto, Figura 57), MSS (Modelo Solo exposto/Seco, Figura 58), MCE (Modelo Chuvoso/Eucalipto, Figura 59) e MCS (Modelo Chuvoso/Solo exposto, Figura 60) foram executados com os parâmetros temporalmente representativos encontrados.

Figura 57 – Escoamento simulado para o MSE

Runoff (overall)

Fonte: Autor.

Figura 58 – Escoamento simulado para o MSS

Runoff (overall)

Fonte: Autor

Figura 59 – Escoamento simulado para o MCE

Fonte: Autor.

Figura 60 – Escoamento simulado para o MCS

Fonte: Autor.

Observa-se que tanto durante o período chuvoso como no período de estiagem, o modelo com solo exposto produziu um volume de escoamento de base superior ao do modelo com eucalipto. Também é possível verificar que os picos de vazão são mais acentuados no modelo com solo exposto.

A rugosidade do solo desempenha papel importante no particionamento da água da chuva em infiltração e escoamento superficial (VAN ECK et al., 2016; ZEMA et al., 2016; WANG et al., 2016). A cobertura vegetal, apesar de atuar como interceptora da precipitação, mitigando os efeitos de uma enxurrada, reduz o volume total infiltrado ao final de um evento chuvoso, diminuindo a recarga potencial do armazenamento subterrâneo, tendo em vista que uma maior parcela da água tende a evapotranspirar. Nesse sentido, áreas de solo exposto tornam-se as maiores fontes de recarga de aquíferos (KEESSTRA et al., 2012; PROSDOCIMI et al., 2016; ZHAO et al., 2016).

4.8 Setorização do modelo

A setorização do modelo seguiu metodologia análoga à dos outros modelos, com a elaboração de dois novos mapas de URHs (Figura 61), um para cada área de drenagem das calhas. O período de execução dos modelos foi de 01/01/2012 a 31/12/2017, porém, somente existem dados consistidos de vazão das calhas de 26/05/2017 a 24/12/2017 (ROSA, 2018). A quantidade de URHs (Tabela 25) é proporcional à extensão e heterogeneidade das áreas drenadas.

Fonte: Autor.

Tabela 25 – Número de URHs geradas para as áreas de drenagem das calhas

Modelo	Número de URHs
Calha a montante	278
Calha a jusante	430

Fonte: Autor.

O modelo com os parâmetros temporalmente representativos produziram os escoamentos simulados dos gráficos das Figura 62 e Figura 63, e as métricas estatísticas de qualidade obtidas nessas simulações estão expressas na Tabela 26.

Figura 62 – Escoamento simulado para a calha 1

Fonte: Autor.

Figura 63 – Escoamento simulado para a calha 2

Fonte: Autor.

Tabela 26 – Valores de NSE, PBIAS e R^2 para os modelos setorizados das calhas

Simulação	NSE	PBIAS	R^2
Calha de montante	-77,08	118,63	0,15
Calha de jusante	-35,41	118,81	0,12

Fonte: Autor.

Os parâmetros, calibrados considerando-se as mudanças do uso do solo, não são capazes de produzir modelos efetivos quando a área de drenagem é alterada, o que pode ser observado pelos valores muito abaixo dos considerados satisfatórios (MORIASI et al., 2008). Valores abaixo de zero para NSE indicam que a média é um melhor preditor do escoamento observado do que o modelo (desempenho inaceitável) (NASH; SUTCLIFFE, 1970; ASCE, 1993; LEGATES; MCCABE, 1999), enquanto valores altos de PBIAS significam que o escoamento está sendo superestimado (GUPTA et al., 1999). Para que o modelo seja efetivamente setorizável, ou seja, capaz de reproduzir o escoamento em qualquer local dentro de sua área, o mesmo deve ser calibrado também espacialmente, para que haja um ajuste apropriado dos parâmetros que são afetados pela área drenada, como por exemplo, o armazenamento subterrâneo inicial (InitRG).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho objetivou a criação de um modelo hidrológico chuva-vazão, implementado no modelo J2K/JAMS, que considerasse as mudanças históricas de uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão da Onça (uma bacia predominantemente agrícola) como fato norteador na calibração dos parâmetros de um modelo representativo.

As constantes mudanças do uso do solo da bacia do Ribeirão da Onça a qualificaram como objeto de estudo de grande valia no contexto das hipóteses levantadas por este trabalho. A análise da variação das áreas ocupadas pelas culturas evidenciou não somente a sazonalidade destas, mas a aleatoriedade das mudanças, impossíveis de serem simuladas por modelos LUCC, devido à inexistência de manchas urbanas com crescimento previsível no interior da bacia.

Durante a etapa de elaboração do modelo, observou-se a fragilidade de modelos conceituais, que muito dependem dos dados de entrada na calibração de seus parâmetros. O reajuste, por meio de regressão linear tripla, dos valores de nível de água medidos pelo transdutor de pressão foi uma das muitas formas de se dar maior consistência aos dados utilizados, que advém de múltiplas fontes.

Inicialmente, foram elaborados quatro modelos independentes (2008, 2011, 2013 e 2015), em que a única diferença entre eles é o mapa de URHs, com seus respectivos usos de solo. Os modelos foram calibrados seis vezes, com 2000 iterações, em que a cada duas calibrações, a probabilidade de cruzamento era alterada (90, 70 e 50%), de forma a garantir que os modelos encontrassem ótimos locais distintos. Os conjuntos de parâmetros considerados os melhores candidatos de cada modelo foram avaliados por meio de aplicação nos demais modelos, com valores de NSE variando de 0,15 a 0,43.

Além disso, um outro programa foi elaborado (GO4) para agrupamento de todos os conjuntos de parâmetros produzidos durante as calibrações (48 mil conjuntos). Este programa permitiu a visualização dos parâmetros em gráficos de dispersão e plot violino, os quais auxiliaram na redução da amplitude de variação dos parâmetros para uma calibração manual, que permitiu escolher um conjunto representativo de parâmetros que pudesse ser utilizado em qualquer variação de URHs na BRO em termos de uso do solo.

O conjunto de parâmetros encontrado foi validado, aplicando-se este ao modelo do ano de 2017, com URHs correspondentes ao uso do solo deste período. A validação ($NSE = 0,26$, $PBIAS = -1,78$ e $R^2 = 0,45$) indicou que os parâmetros encontrados, apesar de poderem ser utilizados para a simulação do escoamento de base, são incapazes de predizer os picos de vazão em eventos chuvosos de alta intensidade.

O desempenho aquém do esperado reflete o esforço em se ter um modelo de alta representatividade. A grande variabilidade na qualidade dos dados de entrada, seja pela gradual degradação dos equipamentos de medição, erros sistemáticos de coleta, desvios de paralaxe, entre outros, aliada à amplitude dos dados (10 anos) dificulta a calibração de um modelo confiável. Ou seja, quanto maior a representatividade, menor a acurácia do modelo.

Uma forma de se mitigar os erros do modelo produzido seria dar maior atenção à parametrização não-calibrável, como por exemplo, os parâmetros de uso do solo, constatados somente por revisão bibliográfica. Porém, os parâmetros não-calibráveis de maior efeito no modelo são aqueles relativos ao armazenamento da água subterrânea, o que envolveria um empenho significativo para encontrar valores mais realistas da localização das interfaces subterrâneas na bacia do Ribeirão da Onça.

A calibração local efetuada evidenciou a potencialidade do modelo, ao permitir que o modelo de 2015, outrora o modelo com a pior simulação de escoamento de base (PBIAS de -20,98), passasse a produzir um escoamento satisfatório (PBIAS de -2,83), além de conseguir um melhor desempenho na reprodução dos picos do escoamento (NSE de 0,39 para 0,71).

A aplicação do modelo nos cenários hipotéticos produziu resultados coerentes. O escoamento de base maior e os picos de vazão acentuados no modelo com solo exposto (em comparação ao modelo com eucalipto) são efeitos corroborados pela literatura.

A incapacidade de setorizar o modelo é justificada pela existência de parâmetros que são apenas coeficientes multiplicativos dos compartimentos de armazenamento, que devem ser proporcionais à área drenada. Nesse sentido, para elaborar um modelo setorizável e representativo das mudanças de uso do solo, deve-se calibrá-lo não somente temporalmente, mas espacialmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMOVIC, M.; BRANGER, F.; BRAUD, I.; KRALISCH, S. Development of a data-driven semi-distributed hydrological model for regional scale catchments prone to Mediterranean flash floods (2016). **Journal of Hydrology**. Doi:10.1016/j.jhydrol.2016.03.032.
- ALCÂNTARA, G.; ROSA, D. M. S.; ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E. C. Separação do escoamento de base na bacia do Ribeirão da Onça (2017). **Anais do XXII Simpósio de Brasileiro de Recursos Hídricos**, Florianópolis, SC.
- AJAMI, J.; MCCABE, M. F.; EVANS, J. P.; STISEN, S. Assessing the impact of model spin-up on surface water-groundwater interactions using an integrated hydrologic model (2014). **Water Resources Research**, v. 50(3), pp. 2636-2656.
- ANDERSEN, J.; REFSGAARD, J. C.; JENSEN, K. H. Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin – model construction and validation (2001). **Journal of Hydrology**, v. 247, pp. 200-214.
- ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; BERTHET, L.; LE MOINE, N.; JERAT, J.; LOUMAGNE, C.; OUDIN, L.; MATHEVET, T.; RAMOS, M. H.; VALÉRY, A. Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models. **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.** v. 13, pp. 1757-1764.
- ARABI, M.; GOVINDARAJU, R. S.; HANTUSH, M. M. Cost-effective allocation of watershed management practices using a genetic algorithm (2001). **Water Resources Research**, v. 42.
- ARABI, M.; GOVINDARAJU, R. S.; HANTUSH, M. M.; ENGEL, B. A. Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of best management practices with SWAT (2006). **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n.2, p. 513-528.
- ASCE. Criteria for evaluation of watershed models (1993). **J. Irrigation Drainage Eng.** v. 119(3), pp. 429-442.
- BARRETO, C. E. A. G. **Balanço hídrico em zona de afloramento do sistema aquífero guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa** (2006). 249 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento). EESC-USP, São Carlos.
- BELL, V.; MOORE, R. The sensitivity of catchment runoff models at different spatial scales. **Hydrol. Earth Sci. Discuss.** v. 13, pp. 1757-1764.
- BERTHET, L.; ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; JAVELLE, P.; How crucial is it to account for the antecedent moisture conditions in flood forecasting? Comparison of event-based and continuous approaches on 178 catchments. **Hydrol Earth Syst. Sci. Discuss.** v. 13, pp 819-831.
- BEVEN, K. **Environmental Modelling: An Uncertain Future?** (2010). Routledge, London, p. 310.

BEVEN, K. **Rainfall-runoff Modelling: The Primer** (2011). John Wiley & Sons.

BEVEN, K. J.; BINLEY, A. M. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction (1992). **Hydrological Processes**, v. 6. pp. 279-298.

BIEGER, K.; HÖRMANN, G.; FOHRER, N. The impact of land use change in the Xiangxi Catchment (China) on water balance and sediment transport (2015). **Reg. Environ. Change**, v. 15 (3), pp. 485-498.

BOLTZMANN, L. Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie (1884). **Annalen der Physik und Chemie**, v. 22, pp. 291-294.

CASTILLO, VL.; GOMEZ-PLAZA, A.; MARTINEZ-MENA, M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach. **Journal of Hydrology**, v. 284(1), pp. 114-130.

CASTRO JUNIOR, P. R.; WENDLAND, E. C. Mapeamento Morfopedológico Aplicado à Bacia-Piloto do Ribeirão da Onça (SP) e à Bacia-Escola do Rio Cachoeirinha (MT) em Áreas de Recarga do Aquífero Guarani (2008). **Relatório PROCAD – Programa Nacional de Cooperação Acadêmica – CAPES**. USP/EESC (Mapa de Solo).

CHE-HAO C.; SHIANG-JEN W.; CHIH-TSUNG H.; JHIH-CYUAN S.; HO-CHENG L. An evaluation framework for identifying the optimal raingauge network based on spatiotemporal variation in quantitative precipitation estimation (2017). **Hydrology Research**, v. 48 (1), pp. 77–98. doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2016.169>

CHEN, J.; BRISSETTE, F. P.; LECONTE, R. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology (2011). **Journal of Hydrology**, v. 401(3-4), pp. 190-202.

CHU, H.-J.; LIN, Y.-P.; HUANG, C.-W.; HSU, C.-Y.; CHEN, H.-Y. Modelling the hydrologic effects of dynamic land-use change using a distributed hydrologic model and a spatial land-use allocation model (2010). **Hydrol. Process**, v. 24, pp. 2538-2554.

CLOKE, H.; RENAUD, J. -P.; CLAXTON, A. J.; MCDONNELL, J. J.; ANDERSON, M. G.; BLAKE, J. R.; BATES, P. D. The effect of model configuration on modelled hillslope-riparian interactions. **Journal of Hydrology**, v. 279 (1), pp. 167-181.

COSGROVE, B. A.; LOHMANN, D.; MITCHELL, K. E.; HOUSER, P. R.; WOOD, E. F.; SCHAAKE, J. C.; ROBOCK, A.; SHEFFIELD, J.; DUAN, Q.; LUO, L.; HIGGINS, W.; PINKER, R. T.; TARPLEY, J. D. Land surface model spin-up behavior in the North American Land Data Assimilation System (NLDAS) (2003). **Journal of Geophysical Research**, v. 108 (D22).

CUO, L. **Land use/cover change impacts on hydrology in large river basins** (2016). Terrestrial Water Cycle and Climate Change: Natural and Huma-Induced Impacts. John Wiley & Sons, Inc (103-134 pp.)

DE MORAES GONÇALVES, J. L.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; DE BARROS FERRAZ, S. F.; DE PAULA LIMA, W.;

BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations (2013). **For. Ecol. Manage.** V. 301, pp. 6-27.

DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II (2002). **Evol. Comput. IEEE Trans.** v. 6, pp. 182-197.

DEFRIES, R.; ESHLEMAN, K. N. Land-use change and hydrologic processes: a major focus for the future (2004). **Hydrological Processes**, v. 18, pp. 2183-2186.

DEVI, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models (2015). **Aquatic Procedia**, v. 4, pp. 1001-1007.

DICKINSON, R. E. Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models (1984) in HANSEN, J. E., TAKAHASHI, T. **Climate Processes and Climate Sensitivity**, v. 29.

DOOGE, J. C. I. Looking for Hydrologic Law (1986). **Water Resources Research**, v. 22, n. 9, pp. 46S–58S.

DOS SANTOS, L. L. Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações (2009). **RBGF - Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 2, Recife, PE.

EGLER, C. A. G. Recent changes in land use and land cover in Brazil (2001). **Human Dimensions of Global Environmental Change: Brazilian Perspectives**. Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, pp. 325-351.

EHSANI, A. H.; QUIEL, F.; MALEKIAN, A. Effect of SRTM resolution on morphometric feature identification using neural network – self organizing map (2010). **Geoinformatica**, v. 14, pp. 405-424.

ERCAN, M. B.; GOODALL, J. L. Estimating watershed-scale precipitation by combining gauge and radar derived observations (2013). **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18(8), pp. 983-994.

EMBRAPA. **Modelagem hidrológica e sensores orbitais para estudos de impactos de mudança de uso e cobertura das terras sobre a disponibilidade hídrica na Bacia do Rio Ji-Paraná, RO** (2012). Disponível em: <<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/hidrojiipa/conteudo/resumo.html>> Acesso em: 21/01/2017.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Crop water requirements** (1956). 154p.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements** (1998). 300p.

FISCHER, C.; KRALISCH, S.; KRAUSE, P.; FINK, M.; FLÜGEL, W. **Calibration of hydrological model parameters with the JAMS framework** (2009). July, pp. 866–872.

FLÜGEL, W. A. Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the river Bröl, Germany (1995). **Hydrological Processes**, v. 9, pp. 423-436.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; VIDAL, A.; SCHMIDT, G.; GARDUÑO, H. The Guarani Aquifer Initiative - towards realistic groundwater management in a transboundary context (2009). **Sustainable Groundwater Management Series**. GW-MATE/World Bank, Washington, 28 pp.

GAN, T. Y.; BIFTU, G. F. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: Optimization algorithms, catchment conditions, and model structure (1996). **Water Resources Research**, v. 32 (12), pp. 3513-3524.

GAO, G.; FY, B.; WANG, S.; LIANG, W.; JIANG, X. Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework (2016). **Sci. Total Environ.** v. 557, pp. 331-342.

GOMES, L. H. **Mecanismos de infiltração e recarga em zona de afloramento do Aquífero Guarani** (2008). Escola de Engenharia de São Carlos - USP. Dissertação de Mestrado.

GÓMEZ, A. A.; NACIONAL, U.; RODRÍGUEZ, L.; NACIONAL, U. The Guarani Aquifer System: Estimation of recharge along the Uruguay-Brazil border (2010). **Hydrogeology Journal**, v. 18, pp. 1667-1684.

GOODRICH, D. C.; SCHMUGGE, T. J.; JACKSON, T. J.; UNKRICH, C. L.; KEEFER, T. O.; PARRY, R.; BACH, L. B.; AMER, S. A. Runoff simulation sensitivity to remotely sensed initial soil water content (1994). **Water Resources Research**, v. 30(5), pp. 1393-1405.

GUANABARA, R. C. **Modelo Transiente de Fluxo em Área de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani** (2011). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado.

GUPTA, H. V.; WAGENER, T.; LIU, Y. Q. Reconciling theory with observations: elements of a diagnostic approach to model evaluation (2008). **Hydrol. Process.** v. 22(18), pp. 3802-3813.

GUPTA, H. V.; KLING, H.; YILMAZ, K. K.; MARTINEZ, G. F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling (2009). **Journal of Hydrology**, v. 377 (1), pp. 80-91.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information (1998). **Water Resources Research**. Vol. 34 (4). pp. 751-763.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration (1999). **Journal of Hydrologic Engineering**. Vol. 4 (2). p. 135-143.

HARMSSEN, E. W.; RAMIREZ, V. H.; GONZALEZ, M. D.; JIA, X. A procedure for estimating short-term actual evapotranspiration (2005). **Journal of Agricultural and Forest Meteorology**. (em preparo)

HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. **Practical Genetic Algorithms** (2004). John Wiley & Sons.

HELMSCHROT, J.; KRALISCH, S.; QUINTINO, M.; MASAMBA, W.; STEUDEL, T.; GÖHMANN, H.; ZANDER, F.; AMBROSION, N.; BAUMBERG, V.; MOSIMANYANA, E.; HOMOLKA, A.; MWEWA, L.; MASHAURI, D.-A.; FLÜGEL, W.-A. Environmental information management and hydrological system modelling for the assessment of hydrological ecosystem functions and services (ESF/ESF) in the Okavango River Basin (2014). **Zbl. Geol. Paläont. Teil I**. doi:10.1127/zgpl/2014/0305-0338.

HENDERSON, F. M. **Open channel flow** (1966). The macmillan Company, 522 p.
HRUWEB. **web-based GRASS-HRU**. FSU Jena. Disponível em: <<http://intecral.uni-jena.de/hruweb/>>. Acesso em: 26/11/2016.

HUISMAN, J. A.; BREUER, L.; BORMANN, H.; BRONSTERT, A.; CROKE, B. F. W.; FREDE, H.-G.; GRÄFF, T.; HUBRECHTS, L.; JAKEMAN, A. K.; KITE, G.; LANINI, J.; LEAVESLEY, G.; LETTENMAIER, D. P.; LINDSTRÖM, G.; SEIBERT, J.; SIVAPALAN, M.; VINEY, N. R.; WILLEMS, P. Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modeling (LUCHEM) III: scenario analysis (2009). **Advanced Water Resources** 32 (2), pp. 159-170.

JAMS BUILDER, version 3.4: **software de modelagem hidrológica**. FSU Jena, 2016.

JUNIOR, A. P. M. A SITUAÇÃO DO MONITORAMENTO DAS ÁGUAS NO BRASIL – INSTITUIÇÕES E INICIATIVAS (2000). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 31, p. 113–135.

KESSTRA, S., KONDRLOVA, E., CZAJKA, A., SEEGER, M., & MAROULIS, J. Assessing riparian zone impacts on water and sediment movement: A new approach (2012). **Netherlands Journal of Geosciences - Geologie En Mijnbouw**, v. 91(1-2), pp. 245-255. doi:10.1017/S0016774600001633

KIM, B. K.; KWON, H. -H.; HAN, D. Exploration of warm-up period in conceptual hydrological modelling (2017). **Journal of Hydrology**, v. 556, pp. 194-210.

KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models (1986). **Hydrological Sciences**, v. 31, n. 1.

KLÖCKING, B.; HABERLANDT, U. Impact of land use changes on water dynamics - a case study in temperate meso and macroscale river basins (2002). **Phys. Chem. Earth**, v. 27, pp. 619-629.

KNOCH, M.; FISCHER, C.; POHL, E.; KRAUSE, P.; MERZ, R. Combined uncertainty of hydrological model complexity and satellite-based forcing data evaluated in two data-scarce semi-arid catchments in Ethiopia (2014). **Journal of Hydrology**, v. 519, pp. 2049-2066.

KRAFT, P.; VACHÉ, K. B.; FREDE, H. G.; BREUER, L. (2011) A hydrological programming language extension for integrated catchment models. **Environmental Modelling and Software**, v. 26, pp. 828-830.

KRALISCH, S.; KRAUSE, P. **JAMS – A Framework for Natural Resource Model Development and Application** (2006). Department of Geoinformatics, Hydrology and Modelling, School of Chemical and Earth Sciences. Friedrich-Schiller-University, Jena.

KRALISCH, S.; KRAUSE, P.; FINK, M.; FISCHER, C.; FLÜGEL, W. A. Component based environmental modelling using the JAMS framework (2009). **Department of Geoinformatics, Hydrology and Modelling, School of Chemical and Earth Sciences**. Friedrich-Schiller-University, Jena, Germany.

KRAUSE, P. Das hydrologische Modellsystem J2000 – Beschreibung und Anwendung in großen Flußgebieten (The hydrological modelling system J2000 – Documentation and application in large river basins) (2001). **Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment**, Band 29.

KRAUSE, P.; KRALISCH, S. The hydrological modelling system J2000 - knowledge core for JAMS (2005). **International Congress on Modelling and Simulation**.

KUNNE, A.; KRALISCH, S.; SANTOS, J. M.; FLUGEN, W. -A. Ecohydrological modeling and scenario impact assessment in rural Rio de Janeiro (2018). Strategies and tools for a sustainable Rio de Janeiro. **Springer**, pp. 1-21.

LAMPARTER, G., NOBREGA, R.L.B., KOVACS, K., AMORIM, R.S., GEROLD, G. Modelling hydrological impacts of agricultural expansion in two macro-catchments in Southern Amazonia, Brazil (2016). **Reg. Environ. Change**. <http://dx.doi.org/10.1007/s10113-016-1015-2>.

LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation (1999). **Water Resources Res.** v. 35(1), pp. 233-241.

LENCASTRE, A. **Hidráulica Geral** (1983). Edição Luso-Brasileira, Lisboa: Hidroprojecto.

LENHART, T.; ECKHARDT, K.; FOHRER, N.; FREDE, H. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis (2002). **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 27, p. 645–654.

LUCHIARI, A.; RIHA, S. J. Bulk Surface Resistance and Its Effect on Evapotranspiration Rates in Irrigated Wheat (1991). **Agron. J.**, v. 83, pp. 888-895.

MACHADO, A. R. **Modelagem chuva-vazão utilizando framework JAMS em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani** (2012). Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

MACHADO, A. R.; WENDLAND, E.; KRAUSE, P. Hydrologic Simulation for Water Balance Improvement in an Outcrop Area of the Guarani Aquifer System (2016). **Environmental Processes**, pp. 1–2.

MAGNUS, G. Versuche über die Spannkkräfte des Wasserdampfs (1844). **Ann. Phys.**, v. 137, pp. 225-247. doi:10.1002/andp.18441370202

MALDONADO, L. H. **Luiz Henrique Maldonado Validação experimental de metodologias para quantificação contínua de vazão no Ribeirão da Onça** (2009). Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

MALDONADO, L. H.; WENDLAND, E. C.; PORTO, R. M. Avaliação de métodos de baixo custo para medição de vazão em córregos (2015). **Rev. Ambient. Água**, v. 10, n. 2, pp. 402-412.

MALEKANI, L.; KHALEGHI, S.; MAHMOODI, M. Application Of Gis In Modeling Zilberchai Basin Runoff (2014). , **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences** v. XL, n. November, pp. 15–17.

MANGO, L.M.; MELESSE, A.M.; MCCLAIN, M.E.; GANN, D.; SETEGN, S.G. Land use and climate change impacts on the hydrology of the upper Mara River Basin, Kenya: results of a modeling study to support better resource management (2011). **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 15 (7), pp. 2245-2258.

MANZIONE, R. L.; TANIKAWA, D. H.; WENDLAND, E. C. Análise de tendências nos níveis freáticos de uma bacia hidrográfica em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG) auxiliado por imagens de sensoriamento remoto (2011). **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, pp. 5380.

MARCUZZO, F. F. N.; ANDRADE, L.; MELO, D. C. R. Métodos de Interpolação no Mapeamento de Chuvas do Estado de Mato Grosso (2011). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 04, pp. 793 – 804.

MARTINEZ-LOZANO, J. A.; TENA, F.; ONRUBIA, J. E.; DE LA RUNIA, J. The historical evolution of the Angstrom formula and its modifications: Review and Bibliography (1984). **Agricultural and forest meteorology**, v. 33, pp. 109-128.

MCMILLAN, H. K.; BOOKER, D. J.; CATTOËN, C. Validation of a national hydrological model (2016). **Journal of Hydrology**, v. 541, pp. 800-815.

MEIRA NETO, A. A.; MELO, D. C. D.; WENDLAND, E. C. Bacia representativa em região de afloramento do aquífero Guarani (2011). In: **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Maceió, AL.

MEYER, W. B.; TURNER II, B. L. Human population growth and global land-use/cover change (1992). **Annu. Rev. Ecol. Syst.**, v. 23, pp. 39-61.

MILLER, S. N.; KEPNER, W. G.; MEHAFFEY, M. H.; HERNANDEZ, M.; MILLER, R. C.; GOODRICH, D. C.; DEVONALD, K. K.; HEGGEM, D. T.; MILLER, W. P. Integrating landscape assessment and hydrologic modeling for land cover change analysis (2002). **J. Am. Water Resour. Assoc.**, v. 38, pp. 915-929.

MOLINA-NAVARRO, E.; TROLLER, D.; MARTINEZ-PEREZ, S.; SASTRE-MERLIN, A.; JEPPESEN, E. Hydrological and water quality impact assessment of a Mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios (2014). **Journal of Hydrology**, v. 434-435, pp. 55-68.

MONTEITH, J. L. (1975) **Vegetation and the atmosphere**. v. 1. Principles. Academic Press, London.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGER, R. L.; HARMEL, E. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations (2007). **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, n. 3, pp. 885-900.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles (1970). **Journal of Hydrology**. Vol. 10. pp. 282-290.

NEPAL, S. Impacts of climate change on the hydrological regime of the koshi river basin in the himalayan region (2016). **Journal of Hydro-environment Research** v. 10, pp. 76-89.

NICKLOW, J. W.; MULETA, M. K. Watershed management technique to control sediment yield in agriculturally dominated areas (2001). **Water Int.** v. 26, pp. 435-443.

NIKOLOPOULOS, E. I.; ANAGNOSTOU, E. N.; BORGA, M.; VIVONI, E. R.; PAPADOPOULOS, A. Sensitivity of a mountain basin flash flood to initial wetness condition and rainfall variability (2011). **Journal of Hydrology**, v. 402(3), pp. 165-178.

NICÓTINA, L.; ALESSI CELEGON, E.; RINALDO, A.; MARANI, M. On the impact of rainfall patterns on the hydrologic response (2008). **Water Resources Research**, v. 44(12).

ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS (OEA). **Aquífero Guaraní: programa estratégico de ação** (2009). Edição Bilingue. Brasil, Argentina, Paraguai, Uruguai, 424 p.

LOUDIN, L.; PERRIN, C.; MATHEVET, T.; ANDRÉASSIAN, V.; MICHEL, C. Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency and the parameters of watershed models (2006). **Journal of Hydrology**, v. 320(1-2), pp. 62-83.

OVERBECK, G. F.; MILLER, S. C.; FIDELIS, A.; PFADENHAYER, J.; PILLAR, V. D.; BLANCO, C. C.; BOLDRINI, I. I.; BOTH, R.; FORNECK, E. D. Brazil's neglected biome: The south brazilian campos (2007). Perspectives in Plant Ecology. **Evolution and Systematics**, v. 9, pp. 101-116.

PECHLIVANIDIS, I. G.; MCINTYRE, N.; WHEATER, H. S. The significance of spatial variability of rainfall on simulated runoff: an evaluation based on the Upper Lee Catchment, UK (2016). **Hydrology Research**, v. 48(4), pp. 1118-1130.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification (2007). **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 11, pp. 1633-1644.

PERROTA, M. M.; SALVADOR, E. D.; LOPES, R. C.; D'AGOSTINO, L. Z.; PERFUFO, N.; GOMES, S. D.; SACHS, L. L. B.; MEIRA, V. T.; GARCIA, M. G. M.; LACERDA FILHO, J. V. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo, Escala 1:750.000** (2005). Formato: shapefile. Programa Geologia do Brasil - PGM, CPRM, São Paulo. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br>> Acesso em 24/10/2016.

POMPÊO, C. A. **Balanço Hídrico da zona não-saturada do solo na bacia do Ribeirão da**

Onça (SP) (1990). Tese de Doutorado, São Carlos, SHS-EESC-USP.

PROSDOCIMI, M.; JORDÁN, A.; TAROLLI, P.; KEESSTRA, S.; NOVARA, A.; CERDÁ, A. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards. **Science of The Total Environment**, v. 547, pp. 323-330.

RAMANKUTTY, N.; GRAUMLICH, L.; ACHARD, F.; ALVES, D.; CHHABRA, A.; DEFRIES, R. S.; FOLEY, J. A.; GEIST, H.; HOUGHTON, R. A.; GOLDEWIJK, K. .; LAMBIN, E. F.; MILLINGTON, A.; RASMUSSEN, K.; REID, R. S.; IL, B. L. T. Global land-cover change: Recent progress, remaining challenges (2006). **Springer-Verlag**, pp. 9-39.

RASMUSSEN, J.; SONNENBORN, T. O.; STISEN, S.; SEABY, L. P.; CHRISTENSEN, B. S. B.; HINSBY, K. Climate change effects on irrigation demands and minimum stream discharge: impact of bias-correction method. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 16, pp. 4675-4691.

RÖDIGER, T.; GEYER, S.; MALLAST, U.; MERZ, R.; KRAUSE, P.; FISCHER, C.; SIEBERT, C. Multi-response calibration of a conceptual hydrological model in the semiarid catchment of Wadi al Arab, Jordan (2014). **Journal of Hydrology**, v. 509, pp. 193-206.

ROSA, D. M. S. **Análise da interação rio aquífero livre: Um estudo de caso na Bacia do Ribeirão da Onça** (2018). Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

RUSSEL, H. Crop evaporation, surface resistance and soil water status (1980). **Agricultural Meteorology**, v. 21, pp. 213-226.

SANGATI, M.; BORGA, M. Influence of rainfall spatial resolution on flash flood modelling (2009). **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.** v. 9(2), pp. 575-584.

SHELLEKENS, J.; BRUIJNZEEL, L. A. Evaporation from a tropical rain forest, Luquillo Experimental Forest, eastern Puerto Rico (2000). **Water Resources Research**, v. 36(8), pp. 2183-2196.

SECK, A.; WELTY, C.; MAXWELL, R. M. Spin-up behavior and effects of initial conditions for an integrated hydrologic model (2015). **Water Resources Research**, v. 51(4), pp. 2188-2210.

SEGOND, M. -L.; WHEATER, H. S.; ONOF, C. The significance of spatial rainfall representation for flood runoff estimation: A numerical evaluation based on the Lee catchment, UK (2007). **Journal of Hydrology**, v. 347(1), pp. 116-131.

SENARATH, S. U.; OGDEN, F. L.; DOWNER, C. W.; SHARIF, H. O. On the calibration and verification of two-dimensional, distributed, Hortonian, continuous watershed models (2000). **Water Resources Research**, v. 36 (6), pp. 1495-1510.

SHAHID, M. A.; BOCCARDO, P.; USMAN, M.; ALBANESE, A.; QAMAR, M. U. Predicting Peak Flows in Real Time through Event Based Hydrologic Modeling for a Trans-Boundary River Catchment (2017). **Water Resour. Manage.** v. 31, pp. 793-810.

SHRESTHA, R.; HOUSER, P. A heterogeneous land surface model initialization study (2010). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115 (D19).

SINDICO, F.; HIRATA, R.; MANGANELLI, A. The Guarani Aquifer System: From a Beacon of hope to a question mark in the governance of transboundary aquifers (2018). **Journal of Hydrology: Regional Studies**, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.008>

SONNTAG, D. Advancements in the field of hydrogeometry (1998). **Meteorologische Zeitschrift**, v. 3, pp. 51-66.

SOROOSHIAN, S. Parameter estimation, model identification, and model validation: conceptual-type models (1991). **Recent advances in the modeling of hydrologic systems**. Springer, pp. 443-467.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Model Calibration (1995). **Computer Models of Watershed Hydrology**, Water Resources Publication.

SPENCER, C. J.; YAKYMCHUK, C.; GHAZNAVI, M. Visualising data distributions with kernel density estimation and reduced chi-squared statistic (2017). **Geoscience Frontiers**, v. 8, pp. 1247-1252.

STEUDEL, T.; BUGAN, R.; KIPKA, H.; PFENNIG, B.; FINK, M.; CLERCQ, W., FLÜGEL, W.-A.; HELMSCHROT, J. Implementing contour bank farming practices into the J2000 model to improve hydrological and erosion modelling in semi-arid Western Cape Province of South Africa (2015). **Hydrology Research** v. 46(2), pp. 192-211.

STONESTROM, D. A.; SCANLON, B.R.; ZHANG, L. Introduction to special section on impacts of land use change on water resources (2009). **Water Resour. Res.** 45.

SUAREZ, J. S. H.; NEJADHASHEMI, A.; KROPP, I. M.; ABOUALI, M.; ZHANG, Z.; DEB, K. Evaluation of the Impacts of Hydrologic Model Calibration Methods on Predictability of Ecologically-Relevant Hydrologic Indices (2018). **Journal of Hydrology**, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.056>.

TANG, Y.; REED, P.; WAGENER, T. et al. How effective and efficient are multi-objective evolutionary algorithms at hydrology model calibration? (2006). **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.** v. 10, pp. 289-307.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods (2012). **Journal of Hydrology**, v. 456-457, pp. 12-29.

TOGNERI, M.; LEWIS, M.; NEILL, S.; MASTERS, I. Comparison of ADCP observations and 3D model simulations of turbulence at a tidal energy site (2017). **Renewable Energy**, v. 114, pp. 273-282.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos** (1998). Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, ed. 1.

TURNER II, B. L., LAMBIN, E. F., REENBERG, A. Land change science special feature: the

emergence of land change science for global environmental change and sustainability (2007). **Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.** 104, 20666-20671.

VAISALA OYJ. **Humidity conversion formulas** (2013). Helsinki, Finland.

VAN ECK, C. M., NUNES, J. P., VIEIRA, D. C. S., KEESSTRA, S., AND KEIZER, J. J. Physically-Based Modelling of the Post-Fire Runoff Response of a Forest Catchment in Central Portugal: Using Field versus Remote Sensing Based Estimates of Vegetation Recovery (2016). **Land Degrad. Develop.**, v. 27, pp. 1535–1544. doi: 10.1002/ldr.2507.

VIVONI, E. R.; ENTEKHAB, D.; BRAS, R. L.; IVANOV, V. Y.; VAN HORNE, M. P.; GRASSOTTI, C.; HOFFMAN, R. N. Extending the predictability of hydrometeorological flood events using radar rainfall nowcasting (2006). **Journal of Hydrometeorology**, v. 7(4), pp. 660-677.

WAGNER, P.D., WASKE, B. Importance of spatially distributed hydrologic variables for land use change modeling (2016). **Environ. Model. Softw.** v. 83, pp. 245-254. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.005>.

WAGNER, P. D.; BHALLAMUDI, S. M.; NARASIMHAN, B.; KUMAR, S.; FOHRER, N.; FIENER, P. Comparing the effects of dynamic versus static representations of land use change in hydrologic impact assessments (2017). **Environ. Model. Softw.** <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.023>

WANG, S.; ZHANG, Z.; MCVICAR, R. T.; GUO, J.; TANG, Y.; YAO, A. Isolating the impacts of climate change and land use change on decadal streamflow variation: assessing three complementary approaches (2013). **Journal of Hydrology**, v. 507, pp. 63-74.

WANG, Y., FAN, J., CAO, L., AND LIANG, Y. Infiltration and Runoff Generation Under Various Cropping Patterns in the Red Soil Region of China (2016). **Land Degrad. Develop.**, v. 27, pp. 83–91. doi: 10.1002/ldr.2460.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring (2007). **Journal of Hydrology**, v. 342, p. 261–269.

WENDLAND, E.; GOMES, L. H.; TROEGER, U. Recharge contribution to the Guarani aquifer system estimated from the water balance method in a representative watershed (2015). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 84 (2), pp. 595 - 609.

YANG, Z.; DICKINSON, R.; HENDERSON-SELLERS, A.; PITMAN, A. Preliminary study of spin-up processes in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes with the first stage data of PILPS phase 1 (a) (1995). **Journal of Geophysical Research**, v. 100, pp. 16553-16578.

YIJIE, S.; GONGZHANG, S. Improved NSGA-II Multi-Objective Algorithm Based on Hybridization-encouraged Mechanism (2008). **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 21, pp. 540-549.

ZEMA, D. A., DENISI, P., TAGUAS RUIZ, E. V., GÓMEZ, J. A., BOMBINO, G., AND FORTUGNO, D. Evaluation of Surface Runoff Prediction by AnnAGNPS Model in a Large Mediterranean Watershed Covered by Olive Groves (2016). **Land Degrad. Develop.**, v. 27, p.

811–822. doi: 10.1002/ldr.2390.

ZHANG, X.; IZAURRALDE, R. C.; ZONG, Z.; ZHAO, K. . THOMSON, A. M. Evaluating the efficiency of a multi-core aware multi-objective optimization tool for calibrating the swat model (2012). **Trans. ASABE**, v. 55(5), pp. 1723-1731.

ZHANG, Y.; WEI, H.; NEARING, M. Effects of antecedent soil moisture on runoff modelling in small semiarid watersheds of southeastern Arizona (2011). **Hydrol. Earth Syst. Sci.** v. 15(10), pp. 3171-3179.

ZHAO, C., GAO, J., HUANG, Y., WANG, G., AND ZHANG, M. Effects of Vegetation Stems on Hydraulics of Overland Flow Under Varying Water Discharges (2016). **Land Degrad. Develop.**, v. 27, pp. 748–757. doi: 10.1002/ldr.2423.

APÊNDICE A – Velocidades e correlações entre os bueiros

Figura 64 – Velocidades e correlações entre os bueiros

MOLINETE	30													
	N Rotações													
DATA	B ESQ			B DIR			Média Esq	Rot/s	Média Dir	Rot/s	VEL ESQUERDO	VEL DIREITO	ESQ/DIR	
07/07/2015	160	154	152	128	129	130	155.33	5.18	129.00	4.30	1.52	1.26	1.20	
29/07/2015	150	155	158	125	127	124	154.33	5.14	125.33	4.18	1.51	1.23	1.23	
11/08/2015	171	172	174	147	146	145	172.33	5.74	146.00	4.87	1.68	1.43	1.18	
25/08/2015	72	71	72	84	85	84	71.67	2.39	84.33	2.81	0.70	0.83	0.85	
15/09/2015	37	37	38	40	40	39	37.33	1.24	39.67	1.32	0.37	0.39	0.94	
29/09/2015	42	43	42	45	46	46	42.33	1.41	45.67	1.52	0.42	0.45	0.93	
15/10/2015	31	30	31	35	36	34	30.67	1.02	35.00	1.17	0.30	0.35	0.88	
27/10/2015	43	46	46	49	50	50	45.00	1.50	49.67	1.66	0.44	0.49	0.91	
10/11/2015	127	122	124	117	117	115	124.33	4.14	116.33	3.88	1.22	1.14	1.07	
24/11/2015	122	120	124	136	140	139	122.00	4.07	138.33	4.61	1.19	1.35	0.88	
22/12/2015	102	102	102	100	102	103	102.00	3.40	101.67	3.39	1.00	1.00	1.00	
21/01/2016	154	149	152	151	146	146	151.67	5.06	147.67	4.92	1.48	1.44	1.03	
02/02/2016	200	203	201	167	166	167	201.33	6.71	166.67	5.56	1.97	1.63	1.21	
16/02/2016	175	175	172	192	187	191	174.00	5.80	190.00	6.33	1.70	1.86	0.92	
08/03/2016	208	204	201	181	187	187	204.33	6.81	185.00	6.17	1.99	1.81	1.10	
22/03/2016	186	189	186	175	175	178	187.00	6.23	176.00	5.87	1.83	1.72	1.06	
05/04/2016	194	200	200	172	172	173	198.00	6.60	172.33	5.74	1.93	1.68	1.15	
20/04/2016	148	144	144	136	138	137	145.33	4.84	137.00	4.57	1.42	1.34	1.06	
17/05/2016	180	180	181	166	164	165	180.33	6.01	165.00	5.50	1.76	1.61	1.09	
14/06/2016	201	201	201	192	191	192	201.00	6.70	191.67	6.39	1.96	1.87	1.05	
28/06/2016	187	189	186	185	182	182	187.33	6.24	183.00	6.10	1.83	1.79	1.02	
26/07/2016	189	189	185	173	173	170	187.67	6.26	172.00	5.73	1.83	1.68	1.09	
09/08/2016	154	151	151	144	145	143	152.00	5.07	144.00	4.80	1.49	1.41	1.06	
25/08/2016	119	116	115	122	121	120	116.67	3.89	121.00	4.03	1.14	1.18	0.96	
08/09/2016	65	63	65	72	72	71	64.33	2.14	71.67	2.39	0.63	0.70	0.90	
22/09/2016	64	68	67	72	72	73	66.33	2.21	72.33	2.41	0.65	0.71	0.92	
06/10/2016	64	69	66	77	77	70	66.33	2.21	74.67	2.49	0.65	0.73	0.89	
20/10/2016	62	64	62	73	70	66	62.67	2.09	69.67	2.32	0.62	0.68	0.90	
10/11/2016	74	72	73	73	72	72	73.00	2.43	72.33	2.41	0.72	0.71	1.01	
24/11/2016	61	60	61	73	74	73	60.67	2.02	73.33	2.44	0.60	0.72	0.83	
												Média	1.01	

Fonte: Autor.

APÊNDICE B – Discretização da bacia em URHs

A discretização da bacia em URHs é feita utilizando a ferramenta HRU-web no intecral.uni-jena.de/hruweb (Figura 65), a qual foi desenvolvida como uma alternativa baseada em web ao *plugin* do QGIS, GRASS-HRU, que teve sua manutenção suspensa.

Figura 65 – Ferramenta de discretização de bacias, HRUweb

Fonte: Autor.

O primeiro passo (Figura 66) é a inserção dos arquivos que serão sobrepostos, sendo eles: modelo digital de elevação (DEM), localização das estações fluviométricas (*Gauges*), mapa de uso e ocupação do solo (*Landuse*), mapa de solos (*Soil*) e mapa geológico (*Geology*). Esses arquivos devem estar na mesma projeção (utilizou-se WGS 84 UTM Zona 23).

Figura 66 – Inserção dos arquivos base no HRUweb

Fonte: Autor.

Em seguida, deve-se realizar o *upload* desses arquivos, e indicar a região onde está localizada a bacia de interesse (Figura 67).

Figura 67 – Localização da bacia no HRUweb

Fonte: Autor.

Após preencher os vazios no Modelo Digital de Elevação e reclassificar os dados de declividade e aspecto (caso necessário), deve-se indicar o número de *pixels* que compõe a menor sub-bacia a ser delineada (Figura 68). Apesar de arbitrário, valores próximos a 1000 produzem resultados razoáveis, com uma quantidade não muito grande de sub-bacias (para uma resolução SRTM 30 m).

Figura 68 – Indicação da quantidade de pixels que compõe a menor sub-bacia

Fonte: Autor.

Então, realoca-se a posição da estação fluviométrica (quando necessário) para que coincida com o talvegue gerado mais próximo (Figura 69).

Figura 69 – Reposicionamento da estação fluviométrica

Fonte: Autor.

A etapa seguinte consiste em definir a quantidade de *pixels* para a menor URH que será criada (Figura 70). Arabi et al. (2006) recomendam que as URHs tenham ao menos 0,04% da área da bacia hidrográfica. Sendo assim, optou-se por utilizar 34 *pixels*, que equivalem a uma área de 0,02 km² em um SRTM de 30 m de resolução, visto que a área da bacia que drena para o ponto de amostragem é de 53,3 km².

Figura 70 – Especificação do número de *pixels* da menor URH gerada

Fonte: Autor.

As etapas posteriores não exigem nenhum tipo de dado de entrada do usuário, sendo que, ao final, é possível baixar os resultados (Figura 71).

Figura 71 – Download dos resultados

Fonte: Autor.

APÊNDICE C – Código em Python que permite analisar a correlação entre os dados hidrológicos e climáticos da bacia

```
# -*- coding: utf-8 -*-
from pandas import read_csv as pd
import os
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.dates as mdates
import datetime as datetime
from math import sqrt
from sklearn.metrics import
mean_squared_error
from scipy.stats.stats import pearsonr
from datetime import datetime
import sys
from PyQt5.QtWidgets import QLabel,
QDateEdit, QPushButton, QVBoxLayout,
QHBoxLayout, QApplication, QWidget
from PyQt5.Qt import QCheckBox,
QFileDialog
from PyQt5.QtCore import QDate, Qt
from numpy import poly1d, polyfit

lini = pd('Base\orun_lini.csv',
sep=';',header=None)
adcp = pd('Base\orun_adcp.csv',
sep=';',header=None)
moli = pd('Base\orun_moli.csv',
sep=';',header=None)
linimoli = pd('Base\orun_lini_moli.csv',
sep=';',header=None)
linisb = pd('Base\orun_lini_s_barragens.csv',
sep=';',header=None)
linisbn =
pd('Base\orun_lini_s_barragens_novo.csv',
sep=';',header=None)

calha1 = pd('Base\orun_calha_1.csv',
sep=';',header=None)
calha2 = pd('Base\orun_calha_2.csv',
sep=';',header=None)
precipCR = pd('Base\precip_CR.csv',
sep=';',header=None)
precipCRR = pd('Base\precip_CR_recuo.csv',
sep=';',header=None)
precipMA = pd('Base\precip_MA.csv',
sep=';',header=None)
precipANA = pd('Base\precip_ANA.csv',
sep=';',header=None)
precipSTO = pd('Base\precip_STO.csv',
sep=';',header=None)
precipSTO2 = pd('Base\precip_STO2.csv',
sep=';',header=None)
n = 1
lista = [lini, adcp, moli, linimoli, linisb, linisbn,
calha1, calha2, n, n, precipCR, precipCRR,
precipMA, precipANA, precipSTO,
precipSTO2]
lista2 = ["Pressure transducer", "ADCP",
"Current meter", "Pressure
transducer+current meter", "Pressure
transducer no dam", "Pressure transducer no
dam new C", "Parshall up", "Parshall down",
"", "", "", "CRHEA", "CRHEA delay", "ANA",
"Santo Ignacio", "Santo Ignacio 2"]
lista3 = ["Runoff (m³/s)", "Rain(mm)"]

class First(QWidget):
    file1 = ""
    file2 = ""
```



```

def __init__(self):
    super().__init__()

    self.init_ui()

def init_ui(self):
    self.lbl = QLabel("Choose one as the first
CSV\n_____ \nFirst
CSV\n_____ \nRunoff:") #Os
widgets da interface são criados aqui
    self.opt1 = QCheckBox("Pressure
transducer")
    self.opt2 = QCheckBox("ADCP")
    self.opt3 = QCheckBox("Current meter")
    self.opt4 = QCheckBox("Pressure
transducer with damming periods replaced by
Current meter")
    self.opt5 = QCheckBox("Pressure
transducer with damming replaced by no
data")
    self.opt6 = QCheckBox("Pressure
transducer no dam (new coefficients)")
    self.opt7 = QCheckBox("Upstream
Parshall flume")
    self.opt8 = QCheckBox("Downstream
Parshall flume")
    self.lbl12 = QLabel("Rain:")
    self.opta = QCheckBox("CRHEA")
    self.optb = QCheckBox("CRHEA delayed
one day")
    self.optc = QCheckBox("Monte Alegre")
    self.optd = QCheckBox("ANA")
    self.opte = QCheckBox("Santo Ignacio de
Loyola")
    self.optf = QCheckBox("Santo Ignacio de
Loyola 2")

```

```

self.lbllinha = QLabel("Choose one as the
second CSV\n_____ \nSecond
CSV\n_____ \nRunoff:")
    self.opt11 = QCheckBox("Pressure
transducer")
    self.opt22 = QCheckBox("ADCP")
    self.opt33 = QCheckBox("Current
meter")
    self.opt44 = QCheckBox("Pressure
transducer with damming periods replaced by
Current meter")
    self.opt55 = QCheckBox("Pressure
transducer with damming replaced by no
data")
    self.opt66 = QCheckBox("Pressure
transducer no dam (new coefficients)")
    self.opt77 = QCheckBox("Upstream
Parshall flume")
    self.opt88 = QCheckBox("Downstream
Parshall flume")
    self.lbl22 = QLabel("Rain:")
    self.optaa = QCheckBox("CRHEA")
    self.optbb = QCheckBox("CRHEA
delayed one day")
    self.optcc = QCheckBox("Monte Alegre")
    self.optdd = QCheckBox("ANA")
    self.optee = QCheckBox("Santo Ignacio
de Loyola")
    self.optff = QCheckBox("Santo Ignacio
de Loyola 2")
    self.optload1 = QPushButton("Load
custom CSV #1")
    self.optload1.setToolTip("Tooltip:\n-
Leave all other checkboxes unselected if you
want to use custom data\n-The data should
start at 01/01/2000 and end at 31/12/2017\n-
The first column should include the dates and

```

the second column the data\n-Empty or invalid data should be replaced by -9999")

```
self.optl1 = QCheckBox("Rainfall?  
(Leave unchecked if runoff)")  
self.fname1 = QLabel("")  
self.optload2 = QPushButton("Load  
custom CSV #2")  
self.optload2.setToolTip("Tooltip:\n-  
Leave all other checkboxes unselected if you  
want to use custom data\n-The data should  
start at 01/01/2000 and end at 31/12/2017\n-The first column should include the dates and  
the second column the data\n-Empty or invalid  
data should be replaced by -9999")
```

```
self.optl2 = QCheckBox("Rainfall?  
(Leave unchecked if runoff)")  
self.fname2 = QLabel("")  
self.lblpear = QLabel("")  
self.lblaviso = QLabel("")  
self.iniData = QDateEdit(self)  
self.finData = QDateEdit(self)  
self.btn = QPushButton("Pearson and 2-  
tailed p test")  
self.varr = QPushButton("Pearson time  
series and gradient")  
self.temp = QPushButton("Time series  
(Only the first CSV)")  
self.temp_comp =  
QPushButton("Comparative time series")  
self.disp = QPushButton("Scatter chart")
```

```
vboxM = QVBoxLayout()  
#Posicionamento dos widgets nas caixas  
verticais e horizontais da janela.
```

```
vbox = QVBoxLayout()  
vbox2 = QVBoxLayout()  
vbox3 = QVBoxLayout()
```

```
hbox = QHBoxLayout()  
hbox2 = QHBoxLayout()  
hbox3 = QHBoxLayout()  
vbox.addWidget(self.lbl)  
vbox.addWidget(self.opt1)  
vbox.addWidget(self.opt2)  
vbox.addWidget(self.opt3)  
vbox.addWidget(self.opt4)  
vbox.addWidget(self.opt5)  
vbox.addWidget(self.opt6)  
vbox.addWidget(self.opt7)  
vbox.addWidget(self.opt8)  
vbox.addWidget(self.lbl12)  
vbox.addWidget(self.opta)  
vbox.addWidget(self.optb)  
vbox.addWidget(self.optc)  
vbox.addWidget(self.optd)  
vbox.addWidget(self.opte)  
vbox.addWidget(self.optf)  
vbox.addWidget(self.optload1)  
vbox.addWidget(self.optl1)  
vbox.addWidget(self.fname1)  
vbox3.addWidget(self.iniData)  
vbox3.addWidget(self.finData)  
vbox3.addWidget(self.btn)  
vbox3.addWidget(self.varr)  
vbox3.addWidget(self.temp)  
vbox3.addWidget(self.temp_comp)  
vbox3.addWidget(self.disp)  
vbox3.addWidget(self.lblpear)  
vbox3.addWidget(self.lblaviso)  
hbox.addLayout(vbox)  
vbox2.addWidget(self.lbllinha)  
vbox2.addWidget(self.opt11)  
vbox2.addWidget(self.opt22)  
vbox2.addWidget(self.opt33)  
vbox2.addWidget(self.opt44)
```

```

vbox2.addWidget(self.opt55)
vbox2.addWidget(self.opt66)
vbox2.addWidget(self.opt77)
vbox2.addWidget(self.opt88)
vbox2.addWidget(self.lbl22)
vbox2.addWidget(self.optaa)
vbox2.addWidget(self.optbb)
vbox2.addWidget(self.optcc)
vbox2.addWidget(self.optdd)
vbox2.addWidget(self.optee)
vbox2.addWidget(self.optff)
vbox2.addWidget(self.optload2)
vbox2.addWidget(self.optl2)
vbox2.addWidget(self.fname2)

hbox.addLayout(hbox2)
hbox3.addLayout(vbox3)
hbox2.addLayout(vbox2)
vboxM.addLayout(hbox)
vboxM.addLayout(hbox3)

hbox.setAlignment(Qt.AlignTop)
hbox2.setAlignment(Qt.AlignTop)
vbox.setAlignment(Qt.AlignTop)
vbox2.setAlignment(Qt.AlignTop)
hbox3.setAlignment(Qt.AlignCenter)

#vbox.addStretch(1)

```

```

self.setLayout(vboxM) #Widget 'mãe' é
instanciado
self.finData.setDate(QDate(2017, 12, 31))
#Configura o segundo Widget de data para
31/12/2017

```

#As linhas abaixo definem quais métodos são chamados e quais argumentos são utilizados quando os botões são pressionados.

```

self.optload1.clicked.connect(lambda:
self.arquivo1(self.fname1))
self.optload2.clicked.connect(lambda:
self.arquivo2(self.fname2))
self.btn.clicked.connect(lambda:
self.btn_clk(self.cBoxes1(), self.cBoxes2(),
self.lblpear, self.iniData, self.finData,
self.lblaviso))
self.varr.clicked.connect(lambda:
self.varr_clk(self.cBoxes1(), self.cBoxes2(),
self.lblpear, self.iniData, self.finData,
self.lblaviso))
self.temp.clicked.connect(lambda:
self.temp_clk(self.cBoxes1(), self.lblpear,
self.iniData, self.finData, self.lblaviso))
self.temp_comp.clicked.connect(lambda:
self.temp_comp_clk(self.cBoxes1(),
self.cBoxes2(), self.lblpear, self.iniData,
self.finData, self.lblaviso, First.file1,
First.file2, self.lBox1(), self.lBox2()))
self.disp.clicked.connect(lambda:
self.disp_clk(self.cBoxes1(), self.cBoxes2(),
self.lblpear, self.iniData, self.finData,
self.lblaviso))

self.show()

```

```

def lBox1(self): #Retorna a opção
selecionada abaixo do botão 'Load custom
CSV #1' (Runoff ou rainfall)

```

```

if(self.optl1.isChecked()):

```

```

    return 1

```

```

else:

```

```

    return 0

```

```

def lBox2(self): #Retorna a opção

```


selecionada abaixo do botão 'Load custom
CSV #2' (Runoff ou rainfall)

```
if(self.opt12.isChecked()):
```

```
    return 1
```

```
else:
```

```
    return 0
```

def cBoxes1(self): #Retorna a opção
selecionada na coluna da esquerda

```
if(self.opt1.isChecked()):
```

```
    return 0
```

```
if(self.opt2.isChecked()):
```

```
    return 1
```

```
if(self.opt3.isChecked()):
```

```
    return 2
```

```
if(self.opt4.isChecked()):
```

```
    return 3
```

```
if(self.opt5.isChecked()):
```

```
    return 4
```

```
if(self.opt6.isChecked()):
```

```
    return 5
```

```
if(self.opt7.isChecked()):
```

```
    return 6
```

```
if(self.opt8.isChecked()):
```

```
    return 7
```

```
if(self.opta.isChecked()):
```

```
    return 10
```

```
if(self.optb.isChecked()):
```

```
    return 11
```

```
if(self.optc.isChecked()):
```

```
    return 12
```

```
if(self.optd.isChecked()):
```

```
    return 13
```

```
if(self.opte.isChecked()):
```

```
    return 14
```

```
if(self.optf.isChecked()):
```

```
    return 15
```

```
else:
```

```
    return -1
```

def cBoxes2(self): #Retorna a opção
selecionada na coluna da direita

```
if(self.opt11.isChecked()):
```

```
    return 0
```

```
if(self.opt22.isChecked()):
```

```
    return 1
```

```
if(self.opt33.isChecked()):
```

```
    return 2
```

```
if(self.opt44.isChecked()):
```

```
    return 3
```

```
if(self.opt55.isChecked()):
```

```
    return 4
```

```
if(self.opt66.isChecked()):
```

```
    return 5
```

```
if(self.opt77.isChecked()):
```

```
    return 6
```

```
if(self.opt88.isChecked()):
```

```
    return 7
```

```
if(self.optaa.isChecked()):
```

```
    return 10
```

```
if(self.optbb.isChecked()):
```

```
    return 11
```

```
if(self.optcc.isChecked()):
```

```
    return 12
```

```
if(self.optdd.isChecked()):
```

```
    return 13
```

```
if(self.optee.isChecked()):
```

```
    return 14
```

```
if(self.optff.isChecked()):
```

```
    return 15
```

```
else:
```

```
    return -1
```

def arquivo1(self, fn1): #Método que abre

janela de diálogo para leitura de arquivos

('Load Custom CSV #1').

```
options = QFileDialog.Options()
```

```
options |=
```

```
QFileDialog.DontUseNativeDialog
```

```
fileName, _ =
```

```
QFileDialog.getOpenFileName(self, "QFileDia
```

```
log.getOpenFileName()", "", "All Files
```

```
(*);;Comma-separated values (*.csv)",
```

```
options=options)
```

```
if fileName:
```

```
    fn1.setText("File name: " +
```

```
os.path.basename(fileName))
```

```
    First.file1 = fileName
```

```
def arquivo2(self, fn2): #Igual ao método
```

anterior, porém para o botão de 'Load Custom

CSV #2'.

```
options = QFileDialog.Options()
```

```
options |=
```

```
QFileDialog.DontUseNativeDialog
```

```
fileName, _ =
```

```
QFileDialog.getOpenFileName(self, "QFileDia
```

```
log.getOpenFileName()", "", "All Files
```

```
(*);;Comma-separated values (*.csv)",
```

```
options=options)
```

```
if fileName:
```

```
    fn2.setText("File name: " +
```

```
os.path.basename(fileName))
```

```
    First.file2 = fileName
```

```
def sArray(self, b1, b2, ini, fin): #Cria duas
```

colunas com os dados b1 e b2, permitindo a

entrada apenas de dados não-nulos.

```
arr = [] #A ser usado como matriz de
```

dados.

```
column0 = []
```

```
column1 = []
```

```
column2 = []
```

```
for i in range(ini, fin):
```

```
    if(b1[1][i] != -9999 and b2[1][i] != -
```

```
9999):
```

```
        column0.append(b1[0][i])
```

```
        column1.append(b1[1][i])
```

```
        column2.append(b2[1][i])
```

```
    arr.append(column0)
```

```
    arr.append(column1)
```

```
    arr.append(column2)
```

```
return arr
```

```
def uniArray(self, b1, ini, fin): #Cria uma
```

coluna com os dados b1, permitindo a entrada

apenas de dados não-nulos.

```
arr = []
```

```
column0 = []
```

```
column1 = []
```

```
for i in range(ini, fin):
```

```
    if(b1[1][i] != -9999):
```

```
        column0.append(b1[0][i])
```

```
        column1.append(b1[1][i])
```

```
    arr.append(column0)
```

```
    arr.append(column1)
```

```
return arr
```

```
def aData(self, m, dat, lbl): #Retorna o
```

índice da matriz onde se encontra a data

requerida

```
for i in range(len(m)):
```

```
    if(m[i] == dat):
```

```
        print(i)
```

```
        lbl.setText("")
```

```
    if(m[i] != -9999):
```

```
        return i
```

```
if(i >= len(m)-1):
```

```

        lbl.setText("Date out of bounds!
Using the final date...")
        print(i)
        return len(m)

    def cData(self, cd): #Converte a lista de
        #datas da classe str para datetime.datetime (para
        #ser usado pelo matplotlib)
        dataC = []
        for i in range(len(cd)):
            dataC.append(datetime.strptime(cd[i],
"%d/%m/%Y"))
        return dataC

    def fDiff(self, datas, dados): #Calcula a
        #diferença em dias entre dois pares de dados
        #consecutivos e retorna o gradiente.
        b = []
        for i in range(1, len(datas)):
            deltaT = (datas[i] - datas[i-1]).days
            b.append(abs(dados[i] - dados[i-
1])/deltaT)
        return b

    def pearFunc(self, ini, fin, b1, b2, lblaviso):
        #Calcula o valor da correlação de pearson e do
        #teste p bicaudal entre duas séries completas.
        iData = ini.date().toString('dd/MM/yyyy')
        fData = fin.date().toString('dd/MM/yyyy')
        iniData = self.aData(b1[0], iData,
        lblaviso)
        finData = self.aData(b1[0], fData,
        lblaviso)
        matr = self.sArray(b1, b2, iniData,
        finData)

        if(len(matr) <= 1):

```

```

        lblaviso.setText("The data series have
no concurrent data!")
        else:
            pear = pearsonr(matr[1], matr[2])
            texto = "Pearson: " + str(pear[0]) +
"\n2-tailed p test: " + str(pear[1])
            lblaviso.setText(texto)

    def btn_clk(self, c1, c2, lbl, ini, fin,
        lblaviso): #Executado quando o botão 'Pearson
        #and 2-tailed p test' é pressionado.
        if(c1 == -1 or c2 == -1):
            lblaviso.setText("Please choose one
CSV on each column!")
        else:
            b1 = lista[c1] #Extrai para b1 o CSV
            #da lista no índice c1
            b2 = lista[c2] #Extrai para b2 o CSV
            #da lista no índice c2
            self.pearFunc(ini, fin, b1, b2, lblaviso)

    def gradient(self, ini, fin, b1, b2, lblaviso):
        #Calcula e exibe o gráfico da correlação linear
        #variando no tempo e do gradiente da
        #correlação linear (diferenças finitas).
        iData = ini.date().toString('dd/MM/yyyy')
        fData = fin.date().toString('dd/MM/yyyy')
        iniData = self.aData(b1[0], iData,
        lblaviso)
        finData = self.aData(b1[0], fData,
        lblaviso)
        matr = self.sArray(b1, b2, iniData,
        finData)
        datas = matr[0][3:-1]
        pear_list = []

        if(len(matr) <= 1): #Se as matrizes não

```

possuírem dados coincidentes em quantidade suficiente (maior que um)

```

lblaviso.setText("The data series have
no concurrent data!")

else:
    lblaviso.setText("Generating graph...")
    for i in range(3, len(matr[0])-1):
        pear = pearsonr(matr[1][0:i],
matr[2][0:i])
        pear_list.append(pear[0])
    dataConv = self.cData(datas)
    deriv = self.fDiff(dataConv, pear_list)
    fig, ax1 = plt.subplots()
    ax1.plot(dataConv, pear_list,
color="green")
    ax1.set_ylabel('Pearson linear
correlation')
    ax2 = ax1.twinx()
    ax2.scatter(dataConv[1:], deriv,
color="blue", s=15, marker="D")
    ax2.set_ylabel('Gradient')
    axes = plt.gca()
    axes.autoscale(enable=True)
    plt.setp(ax1.get_xticklabels(),
rotation=15)
    fig.tight_layout()
    plt.show()

def varr_clk(self, c1, c2, lbl, ini, fin,
lblaviso): #Executado quando o botão
'Pearson time series and gradient' é
pressionado.
    if(c1 == -1 or c2 == -1):
        lblaviso.setText("Please choose one
CSV on each column!")
    else:
        b1 = lista[c1] #Extrai para b1 o CSV

```

da lista no índice c1

```
b2 = lista[c2] #Extrai para b2 o CSV
```

da lista no índice c2

```
self.gradient(ini, fin, b1, b2, lblaviso)
```

```

def temporal1(self, ini, fin, b1, c1,
lblaviso): #Exibe o gráfico de uma série
temporal.
    iData = ini.date().toString('dd/MM/yyyy')
    fData = fin.date().toString('dd/MM/yyyy')
    iniData = self.aData(b1[0], iData,
lblaviso)
    finData = self.aData(b1[0], fData,
lblaviso)
    matr = self.uniArray(b1, iniData, finData)

    if(len(matr) <= 1): #Se as matrizes não
possuírem dados coincidentes em quantidade
suficiente (maior que um)
        lblaviso.setText("The data series have
no concurrent data!")

    else:
        datas = matr[0]
        dataConv = self.cData(datas)
        fig, ax1 = plt.subplots()
        if(c1 >= 10):
            ax1.bar(dataConv, matr[2],
width=10, color="blue")
            ax1.set_ylabel('Rain (mm)' +
lista2[c1])
        else:
            ax1.plot(dataConv, matr[1],
color="green")
            ax1.set_ylabel('Runoff (m³/s)' +
lista2[c1])
            axes = plt.gca()

```

```

axes.autoscale(enable=True)
plt.setp(ax1.get_xticklabels(),
rotation=15)

fig.tight_layout()
plt.show()

def temp_clk(self, c1, lbl, ini, fin, lblaviso):
#Executado quando o botão 'Time series (Only
the first CSV)' é pressionado.
    if(c1 == -1):
        lblaviso.setText("Please choose one
CSV on the first column!")
    else:
        b1 = lista[c1] #Extrai para b1 o CSV
da lista no índice c1
        self.temporal1(ini, fin, b1, c1, lblaviso)

def temporal2(self, ini, fin, b1, b2, c1, c2,
lblaviso): #Exibe o gráfico comparativo de
duas séries temporais.
    iData = ini.date().toString('dd/MM/yyyy')
    fData = fin.date().toString('dd/MM/yyyy')
    iniData = self.aData(b1[0], iData,
lblaviso)
    finData = self.aData(b1[0], fData,
lblaviso)
    matr = self.sArray(b1, b2, iniData,
finData)

    if(len(matr) <= 1): #Se as matrizes não
possuírem dados coincidentes em quantidade
suficiente (maior que um)
        lblaviso.setText("The data series have
no concurrent data!")

```

```

else:
    datas = matr[0]
    dataConv = self.cData(datas)
    fig, ax1 = plt.subplots()
    if((c1 >= 10 and c2 >= 10) or (c1 < 10
and c2 < 10)):
        if(c1 >= 10):
            plt.plot(dataConv, matr[1], 'g^',
dataConv, matr[2], 'bs')
            plt.ylabel("Rain (mm) " +
lista2[c1] + " => (green) " + lista2[c2] + " =>
(blue)")
        else:
            plt.plot(dataConv, matr[1], 'green',
dataConv, matr[2], 'blue')
            plt.ylabel("Runoff (m³/s) " +
lista2[c1] + " => (green) " + lista2[c2] + " =>
(blue)")

    plt.show()

else:
    fig, ax1 = plt.subplots()
    if(c1 >= 10):
        ax1.bar(dataConv, matr[1],
width=1, color="green")
        ax1.set_ylabel("Rain (mm) " +
lista2[c1], color="green")
    else:
        ax1.plot(dataConv, matr[1],
color="green")
        ax1.set_ylabel("Runoff (m³/s) " +
lista2[c1], color="green")
        axes = plt.gca()
        if(c1 >= 10):
            axes.invert_yaxis()

```

```

ax2 = ax1.twinx()

if(c2 >= 10):
    ax2.bar(dataConv, matr[2],
width=1, color="blue")
    ax2.set_ylabel('Rain (mm) ' +
lista2[c2], color="blue")
else:
    ax2.plot(dataConv, matr[2],
color="blue")
    ax2.set_ylabel('Runoff (m³/s) ' +
lista2[c2], color="blue")
    axes = plt.gca()
    if(c2 >= 10):
        axes.invert_yaxis()

    axes.autoscale(enable=True)
    plt.setp(ax1.get_xticklabels(),
rotation=15)

fig.tight_layout()
plt.show()

def temp_comp_clk(self, c1, c2, lbl, ini, fin,
lblaviso, f1, f2, l1, l2): #Executado quando o
botão 'Comparative time series' é pressionado.
    if(c1 == -1 or c2 == -1):
        if((f1 != "") and (f2 != "")):
            d1 = pd(f1, sep=';', header=None)
            d2 = pd(f2, sep=';', header=None)
            self.temporal2(ini, fin, d1, d2, c1, c2,
lblaviso)
        else:
            lblaviso.setText("Please choose one
CSV on each column!")
    else:

```

```

b1 = lista[c1] #Extrai para b1 o CSV
da lista no índice c1
b2 = lista[c2] #Extrai para b2 o CSV
da lista no índice c2
self.temporal2(ini, fin, b1, b2, c1, c2,
lblaviso)

def dispersao(self, ini, fin, b1, b2, c1, c2,
lblaviso): #Exibe o gráfico de dispersão de
duas séries temporais.
    iData = ini.date().toString('dd/MM/yyyy')
    fData = fin.date().toString('dd/MM/yyyy')
    iniData = self.aData(b1[0], iData,
lblaviso)
    finData = self.aData(b2[0], fData,
lblaviso)
    matr = self.sArray(b1, b2, iniData,
finData)

    if(len(matr) <= 1): #Se as matrizes não
possuírem dados coincidentes em quantidade
suficiente (maior que um)
        lblaviso.setText("The data series have
no concurrent data!")
    else:
        fit = polyfit(matr[1], matr[2], 1)
        m, b = polyfit(matr[1], matr[2], 1)
        #Extrai os coeficientes angular e linear,
respectivamente, da regressão linear.
        fit_fn = poly1d(fit)
        fig, ax1 = plt.subplots()
        ax1.scatter(matr[1], matr[2], s=10,
color="green", marker='x')
        ax1.plot(matr[1], fit_fn(matr[1]), '-k')
        texto = "m:" + str(m) + "\nb: " + str(b)
        ax1.text(0.5, 0.5, texto, fontsize=12,

```

```

horizontalalignment='center',
verticalalignment='top',
transform=ax1.transAxes)
    if(c1 >= 10):
        ax1.set_xlabel('Rain (mm) ' +
lista2[c1])
    else:
        ax1.set_xlabel('Runoff (m³/s) ' +
lista2[c1])
    if(c2 >= 10):
        ax1.set_ylabel('Rain (mm) ' +
lista2[c2])
    else:
        ax1.set_ylabel('Runoff (m³/s) ' +
lista2[c2])
    axes = plt.gca()
    axes.autoscale(enable=True)
    fig.tight_layout()
    plt.show()

def disp_clk(self, c1, c2, lbl, ini, fin,
lblaviso): #Executado quando o botão
'Scatter chart' é pressionado.
    if(c1 == -1 or c2 == -1):
        lblaviso.setText("Please choose one
CSV on each column!")
    else:
        b1 = lista[c1] #Extrai para b1 o CSV
da lista no índice c1
        b2 = lista[c2] #Extrai para b2 o CSV
da lista no índice c2
        self.dispersao(ini, fin, b1, b2, c1, c2,
lblaviso)

app = QApplication(sys.argv)

```

```

a_window = First()
sys.exit(app.exec_())

```


APÊNDICE D – Código em Python que permite visualizar a distribuição dos parâmetros dos modelos após múltiplas calibrações

```

import sys
import os
import matplotlib.pyplot as plt
from threading import Timer
from PyQt5.QtWidgets import QLabel,
QPushButton, QVBoxLayout, QApplication,
QWidget, QDialog
from PyQt5.Qt import QFileDialog
from PyQt5.QtCore import Qt

count = 0
paramNames = []
pathList = []
optList = []
opt2008 = []
opt2011 = []
opt2013 = []
opt2015 = []
candList = []
paramList = []
optList.extend((opt2008, opt2011, opt2013,
opt2015))
vbox = QVBoxLayout()
candidatos = 2000

class Arrastar(QPushButton): #Classe que
permite arrastar os arquivos para serem lidos
pelo programa.
    def __init__(self, title, parent):
        super().__init__(title, parent)
        self.setAcceptDrops(True)

    def dragEnterEvent(self, event):
        #Verifica se os arquivos arrastados possuem
        localizador URL.
        if(event.mimeData().hasUrls()):
            event.accept()
        else:
            event.ignore()

    def dropEvent(self, event): #Adiciona cada
URL dos arquivos arrastados a uma lista global
pathList
        for url in event.mimeData().urls():
            path = url.toLocalFile()
            if(os.path.isfile(path)):
                pathList.append(path)

    def mousePressEvent(self, e): #Permite
que o usuário use um diálogo de abertura de
arquivos comum, caso prefira clicar no botão
ao invés de arrastar arquivos.
        super().mousePressEvent(e)
        if e.button() == Qt.LeftButton:
            options = QFileDialog.Options()
            options |=
QFileDialog.DontUseNativeDialog
            fileNames, _ =
QFileDialog.getOpenFileNames(self, "QFileDi
alog.getOpenFileName()", "", "All Files
(*)", "Comma-separated values (*.csv)",
options=options)
            if fileNames:
                for i in range(len(fileNames)):
                    pathList.append(fileNames[i])
Janela.adNome(self)

```

class Janela(QWidget): *#Classe principal
contendo os demais botões, textos e funções.*

def __init__(self): *#MÉTODO*

*MINIMIZADO: Executa o método init_ui ao
instanciar a classe Janela.*

super().__init__()

self.init_ui()

def init_ui(self): *#MÉTODO*

*MINIMIZADO: Acrescenta e posiciona todos
os 'widgets' na janela principal*

self.titulo = QLabel(*"Click 'Execute' to
look for a global optimal set of parameters"*)
#Criando os elementos que compõem a janela
self.load = Arrastar(*"\nDrag the set of
optimizer files here or click to browse for
them\n"*, self)

self.load.setToolTip(*"Tooltip: \n-Make
sure the first four characters of all file names
represent the year of the model (e.g.
2011_09)\n-Only use files created through
OPTAS"*)

self.display = QPushButton(*"Display file
names"*)

self.candidBotao =
QPushButton(*"Change number of candidates"*)

self.run = QPushButton(*"\nExecute\n"*)

self.clear = QPushButton(*"Clear"*)

self.scatt = QPushButton(*"Display scatter
chart"*)

self.violin = QPushButton(*"Display violin
plot"*)

self.lbl = QLabel("", self)

self.val = QLabel(*"\nNumber of possible
candidates on each optimal.dat: " +
str(candidatos))*

self.files = QLabel("")

vbox.addWidget(self.titulo) *#Adicionando
os primeiros elementos à janela*

vbox.addWidget(self.load)

vbox.addWidget(self.display)

vbox.addWidget(self.candidBotao)

vbox.addWidget(self.clear)

vbox.addWidget(self.run)

vbox.addWidget(self.val)

vbox.addWidget(self.lbl)

vbox.addWidget(self.files)

vbox.setAlignment(Qt.AlignTop)

self.setLayout(vbox)

self.display.clicked.connect(**lambda:**
self.displayF(self.files, pathList))

*#Direcionando os botões aos métodos que irão
executar.*

self.clear.clicked.connect(**lambda:**
self.limpar(self.lbl, self.files))

self.run.clicked.connect(**lambda:**
self.executar(self.lbl, vbox, pathList))

self.scatt.clicked.connect(**lambda:**
self.optScatter())

self.violin.clicked.connect(**lambda:**
self.optViolin())

self.candidBotao.clicked.connect(**lambda:**
self.candidB(self.val))

self.show()

def leitorTab(self, p, lbl): *#Método que
faz a leitura dos arquivos nas localizações
listadas em pathList*

i = 0

```

lista = []
with open(p) as f:
    for line in f:
        if(i == 5 and len(paramNames) ==
0): #Escreve os nomes dos parametros (linha
6 nos arquivos .dat) em uma lista paramNames
            paramNames.append([y.strip("\n")
for y in line.split("\t")[1:]])
            #paramNames.append(line)
            if(i > 9):
                lista.append([x.strip("\n") for x in
line.split("\t")])
                i += 1
            del lista[-1]
            global opt2008
            global opt2011
            global opt2013
            global opt2015
            if(os.path.basename(p)[0:4] == '2008'):
#As linhas condicionais abaixo verificam os
anos de cada arquivo para adicioná-los a uma
lista específica.
                opt2008.append(lista)
            elif(os.path.basename(p)[0:4] == '2011'):
                opt2011.append(lista)
            elif(os.path.basename(p)[0:4] == '2013'):
                opt2013.append(lista)
            elif(os.path.basename(p)[0:4] == '2015'):
                opt2015.append(lista)
            else:
                lbl.setText("One of the files has an
invalid name")

def displayF(self, f, pl): #Exibe os nomes
dos arquivos na pathList.
    namesF = ""
    for i in range(len(pl)):

```

```

        namesF +=
os.path.basename(pathList[i]) + "\n"
        f.setText(namesF)

def sortCand(self): #Cria uma lista candList
contendo a quantidade exigida de elementos a
serem analisados
    global candList
    global optList
    temp = []
    for i in range(len(optList)):
        if(len(optList[i]) == 0):
            continue
        else:
            del temp[:]
            for j in range(len(optList[i])):
                if(len(optList[i][j]) <= 10):
                    continue
                else:
                    optList[i][j].sort(key=lambda x:
x[-1])
            temp.append(optList[i][j][:candidatos])
            candList.append(temp[:])

def optSearch(self): #Cria uma lista
vertical com os parâmetros da candList.
    global candList
    global paramList
    del paramList[:]
    temp = []
    for l in range(1, len(candList[0][0][0])):
        del temp[:]
        for i in range(len(candList)):
            for j in range(len(candList[i])):
                for k in range(len(candList[i][j])):

```

```

temp.append(float(candList[i][j][k][l]))
    paramList.append(temp[:])

def executar(self, lbl, vb, local): #Executa
os métodos anteriores.

    global optList
    global paramList
    if(len(pathList) == 0):
        lbl.setText("No files to analyze!")
    else:
        lbl.setText("Done!")
        for i in range(len(local)):
            self.leitorTab(local[i], lbl)
        self.sortCand()
        self.optSearch()
        vb.addWidget(self.scat)
        vb.addWidget(self.violin)

def optScatter(self): #Exibe gráfico de
dispersão dos parâmetros em calibração.
    fig, ax = plt.subplots(nrows=3, ncols=6)
    c = 0
    for row in ax:
        for col in row:
            for i in range(len(optList)):
                if(i != len(optList)-1):

col.axvline(x=candidatos*len(optList[i])*(i+1)
, color='green', zorder=0, alpha=0.8)

                for j in range(len(optList[i])-1):

###

col.axvline(x=(candidatos*(j+1)+candidatos*(i
)*len(optList[i])), color='red', zorder=0,
alpha=0.7)

                xpos = [6000, 18000, 30000, 42000]

                labels = [item.get_text() for item in
col.get_xticklabels()]
                labels = ["2008", "2011", "2013",
"2015"]
                col.set_xticks(xpos)
                col.set_xticklabels(labels)
                print(candidatos*len(pathList))

col.scatter(range(candidatos*len(pathList)),
paramList[c], s=2, marker='v', zorder=10)
                col.set_title(paramNames[0][c],
fontsize=8)

                if(c == 0):
                    #col.xlabel('Iterations')
                    #col.ylabel('Parameter value')
                    leg = col.legend(["Model divisor",
"Optimization divisor"], fontsize=8,
loc='center left', bbox_to_anchor=(-0.8, 0.5),
framealpha=0.8)

                    for _txt in leg.texts:
                        _txt.set_alpha(0.8)

                    if(c == 6):
                        col.set_ylabel("Parameter value",
fontsize=14)

                    if(c == 14):

                        col.set_xlabel("Model year",
fontsize=14)

                        col.xaxis.set_label_coords(1.1, -
0.1)

                        c += 1

                    fig.suptitle("Parameter distribution
during calibration", fontsize=14,
color="blue")

                    plt.show()

def optViolin(self): #Exibe plot violino

```

dos parâmetros em calibração.

```
fig, ax = plt.subplots(nrows=3, ncols=6)
c = 0
for row in ax:
    for col in row:
        col.violinplot(paramList[c],
points=candidatos, widths=0.3,
showmeans=False, showextrema=True,
showmedians=True, bw_method='silverman')
        col.set_title(paramNames[0][c],
fontsize=8)
        if(c == 0):
            leg = col.legend(["Parameters",
"Median"], fontsize=8, loc='center left',
bbox_to_anchor=(-0.6, 0.5), framealpha=0.8)
            for _txt in leg.texts:
                _txt.set_alpha(0.8)
        if(c == 6):
            col.set_ylabel("Parameter value",
fontsize=14)
        if(c == 14):
            col.set_xlabel("Density function",
fontsize=14)
        col.xaxis.set_label_coords(1.1, -
0.1)
        c += 1
    fig.suptitle("Parameter distribution
during calibration (violin plot)", fontsize=14,
color="blue")
    plt.show()

def lJanela(self): #Deixa o texto do QLabel
lbl vazio.
    self.lbl.setText("")

def candidB(self, val): #Permite input de
quantos elementos devem ser analisados por
```

modelo.

```
global candidatos
num, ok = QInputDialog.getInt(self,
"Candidates", "Number:", candidatos, 0, 2000,
1)
if(ok):
    candidatos = num
    val.setText("\nNumber of possible
candidates on each optimal.dat: " +
str(candidatos))

def limpar(self, lbl, f): #Remove todos os
itens das listas.
    global pathList
    global optList
    global candList
    global paramList
    global paramNames
    global opt2008
    global opt2011
    global opt2013
    global opt2015
    del pathList[:]
    del optList[:]
    del candList[:]
    del paramList[:]
    del paramNames[:]
    del opt2008[:]
    del opt2011[:]
    del opt2013[:]
    del opt2015[:]
    print(pathList)
    lbl.setText("File list cleared")
    f.setText("")
    t = Timer(3.0, self.lJanela)
    t.start()
```

```
app = QApplication(sys.argv)
a_window = Janela()
sys.exit(app.exec_())
```


APÊNDICE E – Gráficos de dispersão dos parâmetros calibrados

Figura 72 – Gráficos de dispersão dos parâmetros calibrados
Parameter distribution during calibration

Fonte: Autor.

APÊNDICE F – Gráficos violinos dos parâmetros calibrados

Figura 73 – Gráficos violinos dos parâmetros calibrados

Parameter distribution during calibration (violin plot)

Fonte: Autor.